Canadian Institute for International Peace and Security

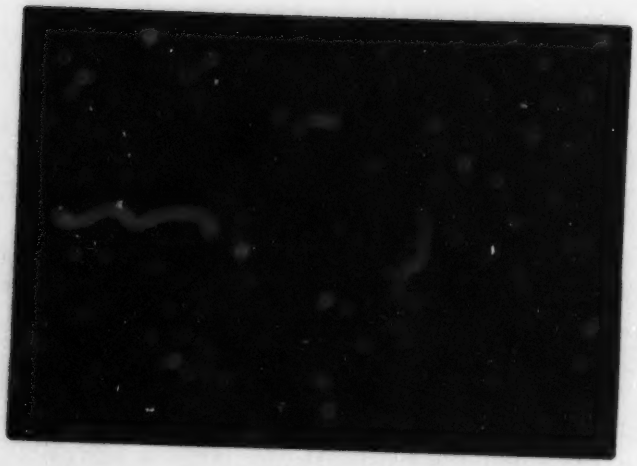
Institut canadien pour la paix et la sécurité internationales

DOCUMENT DE TRAVAIL N° 24

CANADA ET SOUS-MARINS TECHNOLOGIE ET POLITIQUE

par Bernard Goulard

juin 1990



92-07802/

DOCUMENT DE TRAVAIL N° 24

CANADA ET SOUS-MARINS
TECHNOLOGIE ET POLITIQUE

par Bernard Goulard

juin 1990

Pour obtenir des copies additionnelles :

360, rue Albert, bureau 900
Ottawa (Ontario)
K1R 7X7

ISBN 0-662-96205-2

PRÉFACE

Les documents de travail de l'Institut canadien pour la paix et la sécurité internationales rendent compte des travaux de recherche en cours, ou sont le compte rendu d'une conférence; ils sont souvent destinés à une publication ultérieure, soit par l'Institut, soit par un autre organisme; l'Institut considère qu'il est intéressant d'en diffuser immédiatement un nombre restreint d'exemplaires, essentiellement aux spécialistes des domaines en question. Contrairement à toutes les autres publication de l'Institut, les travaux de recherche en cours ne sont publiés que dans leur langue originale; seul un résumé est publié dans l'autre langue officielle.

Les opinions exprimées dans les documents sont celles de leurs auteurs et ne représentent pas nécessairement celles de l'Institut ou de son Conseil d'administration.

Bernard Goulard est chercheur au Laboratoire de physique nucléaire de l'Université de Montréal.

AVANT-PROPOS

Ce document de travail est le fruit d'une recherche commencée en octobre 1988. La question, à ce moment-là, était centrée sur les sous-marins à propulsion nucléaire (SPN) : le Canada était-il «dans le droit chemin» en envisageant leur acquisition ?, avec les questions satellites qui s'en suivaient : SPN français ou britanniques ?, le choix d'autres systèmes de propulsion ?, les incidences face au Traité de non-prolifération, etc. ? L'annulation, pour des raisons d'ordre budgétaire, du Projet canadien d'acquisition de sous-marins nucléaire (PCAS) en avril 1989, a nécessité une réorientation de notre recherche vers d'autres options possibles basées sur des sous-marins conventionnels, peut-être hybrides.

Plus l'auteur avançait dans ce dossier, plus il réalisait que le «débat» sur les SPN s'était déroulé dans la confusion. Au lieu de porter sur la définition d'une politique maritime canadienne d'où découleraient des missions à accomplir pour arriver ensuite aux «plate-formes» nécessaires à l'exécution de ces missions, ce débat a dévié. Il a porté sur

l'acceptation ou le refus du symbole «nucléaire» plutôt que sur une évaluation technologique tant-soit-peu éclairée. L'annulation du projet a d'ailleurs amené le grand public à se désintéresser de la politique maritime du Canada; la question, pourtant, reste entière.

Ce document de travail présente d'abord un aperçu des technologies essentielles dans le domaine des sous-marins. Malgré son caractère élémentaire, cet exposé a été le fruit de nombreuses lectures, échanges et recoupements d'information. J'en profite pour remercier ici tous ceux (et celle) qui ont bien voulu consacrer de leur temps à ces discussions. La deuxième partie de ce travail présente un certain nombre de commentaires sur le programme maintenant défunt des SPN : il en ressort que la décision en faveur de la propulsion nucléaire présentée par le MDN n'était pas ni délirante ni «diabolique», mais présentait des problèmes, surmontables certes, mais que n'ont pas semblé toujours réaliser les promoteurs du projet ni les dirigeants du pays. Dans une dernière partie, axée sur les choix possibles pour le Canada du point de vue technologique, il ressort que, si le pays désire contrôler lui-même l'accès maritime à ses côtes et en particulier la partie canadienne de l'Arctique, l'incorporation de propulsion indépendante de l'air (PIA) dans un nombre minimal de sous-marins doit être sérieusement considérée.

TABLE DES MATIÈRES

CONDENSÉ **1**

EXECUTIVE SUMMARY **3**

INTRODUCTION **5**

1. LE DÉBAT CANADIEN **7**

2. LE CONTEXTE TECHNOLOGIQUE **9**

2.1. Du submersible au sous-marin
2.2. Le sous-marin dans l'océan
2.3. Propulsion
2.3.1. Le SPN à toute vapeur
2.3.2. Sous-marins diesel-électriques
2.3.3. Hybrides
2.4. L'évolution des technologies

3. L'ACQUISITION DE SOUS-MARINS PAR LE CANADA **31**

3.1. Les méandres de la décision canadienne
3.2. À propos du débat sur les SPN
3.2.1. Faut-il brûler le nucléaire ?
3.2.2. Sécurité, performance et accidents
3.2.3. SPN et Traité de non-prolifération (TNP)
3.2.4. Incidence sur l'industrie

4. ET MAINTENANT, QUELLES OPTIONS ? **43**

4.1. État de la question
4.2. Sous-marins conventionnels
4.3. Scénario pour sous-marins canadiens

ANNEXE : TRAFALGAR ET AMÉTHYSTE **51**

BIBLIOGRAPHIE **55**

CONDENSÉ

Après avoir fait les manchettes de juin 1987 à avril 1989 avec le projet d'achat de sous-marins à propulsion nucléaire, la stratégie maritime canadienne est redevenue l'objet de l'indifférence générale. Le présent travail étudie l'articulation entre la technologie et la politique en ce qui a trait à cette stratégie et, il porte une attention particulière à l'acquisition de sous-marins.

Passant d'abord en revue les arguments soulevés par les différents acteurs au cours du débat qui a suivi la parution du Livre blanc en 1987, le présent travail montre ensuite, en s'appuyant sur l'élément technologique, comment les «sous-marins» sont passés de l'état de submersibles à celui de véritables sous-marins durant les années de l'après-guerre. Le domaine de l'évolution des ondes sonores dans l'eau et celui des modes de propulsion sous-marine sont plus particulièrement étudiés. Après une brève description des sous-marins nucléaires (SPN), les caractéristiques des sous-marins traditionnels diesel-électriques sont abordées. Constatant les progrès et les limitations qu'amène ce type de sous-marins, l'auteur présente les nouvelles techniques (nucléaires ou non nucléaires) de propulsion indépendantes de l'air, qui sont à l'étude et en développement depuis déjà quelques années.

La politique canadienne en matière d'acquisition de sous-marins est alors considérée; on constate que les autorités canadiennes, intéressées par l'acquisition de sous-marins nucléaires dès 1958, se rabattent sur l'achat de trois sous-marins traditionnels *Oberon*, quelques années plus tard. Les péripéties qui ont suivi la publication du Livre blanc sont esquissées : les attitudes canadiennes concernant l'énergie nucléaire en général, les incidences qu'aurait eu l'acquisition de sous-marins nucléaires sur le Traité de non-prolifération et sur l'industrie, etc.

La dernière partie de l'ouvrage est consacrée à la situation telle qu'elle se présente au Canada en cette année 1990, dans un contexte international différent de celui qui prévalait lors de la parution du Livre blanc, et avec la perspective d'une flotte sans sous-marins nucléaires. L'auteur suppose que le ministère de la Défense nationale

(MDN) sera amené, dans un premier temps, à choisir des sous-marins traditionnels, puis un type de propulsion indépendante de l'air, dans un avenir plus éloigné.

L'auteur termine en rappelant que le problème des sous-marins se situe dans le contexte plus général de la stratégie maritime canadienne qui, elle, reste à définir par le gouvernement.

EXECUTIVE SUMMARY

After a period in the headlines -- from April 1987 to June 1989 -- with the government project to purchase nuclear-powered submarines the subject of general debate, Canadian naval strategy has returned to being an object of public indifference. This paper studies the connection between the technologies and policies involved in that strategy, with particular attention paid to the question of the acquisition of submarines.

After reviewing the arguments raised by various proponents during the debate which followed the release of the 1987 Defence White Paper, this study traces the technological evolution of submarines. In the post-war years these vessels went from being submersible ships that could operate under water some of the time, to true submarine craft. Special attention is paid to the propagation and detection of sound waves under water, and to the various means of submarine propulsion.

Following a brief description of nuclear-powered submarines (SSNs), the paper addresses the characteristics of traditional diesel-electric submarines. The author notes the progress in, as well as limitations of, this kind submarine technology, and then describes new methods (nuclear and non-nuclear) of air-independent propulsion developed in recent years.

The evolution of Canadian policy regarding the acquisition of submarines is also considered. Having been interested in acquiring nuclear-powered submarines as early as 1958, Canadian authorities settled, only a few years later, for obtaining three traditional Oberon-type submarines. The changes in fortune for the nuclear-powered submarine project following the 1987 White Paper are traced including: Canadian attitudes to nuclear power in general, the possible impact of SSN acquisition on the Nuclear Non-Proliferation Treaty, as well as implications for industry.

The final part of the paper is devoted to the present international situation -- a context for Canada quite different from the one into which the 1987 White Paper was released, one in which a fleet of Canadian SSNs was conceivable. The author expects that the Department of National Defence will, in the near term, purchase traditional diesel-electric submarines, while in the longer term might move in the direction of submarines with some form of air-independent propulsion.

The author concludes with a reminder that the problem of choosing submarines must be considered in the context of Canadian naval strategy -- an area yet to be defined by the government.

INTRODUCTION

Juin 1987. Le projet d'acquisition de dix à douze sous-marins à propulsion nucléaire (SPN) par la Marine canadienne émergeait officiellement avec la publication du Livre blanc sur la défense. Ce programme représentait l'achat d'équipement le plus important dans l'histoire des forces armées canadiennes. Il allait déclencher au pays nombre de controverses qui feront couler beaucoup d'encre et de salive. Avril 1989, le budget Wilson annonce l'annulation du projet. Le gouvernement maintient son adhésion à la politique de défense énoncée dans le Livre blanc mais déclare qu'il n'a plus les moyens de se payer l'instrument choisi pour sa stratégie maritime, soit les sous-marins à propulsion nucléaire (SPN). Dans le débat sur la dimension sous-marine de cette stratégie, le contexte technologique est resté étranger, pour ne pas dire inconnu, à beaucoup d'intervenants; par ailleurs, les développements technologiques des sous-marins et leur conséquences opérationnelles sont aussi nombreux qu'importants. Le but de notre exposé est donc de présenter le cadre technologique de ce débat et son articulation avec les options de la stratégie maritime canadienne. Dans une première partie, l'évolution technique des sous-marins durant les cinquante dernières années est présentée brièvement. La deuxième partie fera état de la tradition de lutte anti sous-marine (ASM) de la Marine canadienne puis des méandres du processus de décision quant à l'achat de sous-marins nucléaires. Enfin, les questions telles qu'elles se posent en ce début d'année 1990, seront évoquées.

1. LE DÉBAT CANADIEN

Au cours des mois qui ont suivi la publication du Livre blanc sur la défense, certains points sont ressortis constamment des débats: le prix des SPN, qui avait été évalué en 1986-1987 à 8 millards de dollars, était considéré comme raisonnable par les partisans du projet; les opposants le jugeaient par contre trop élevé et de toute façon grossièrement sous-estimé par le ministère de la Défense nationale (MDN). Par ailleurs, les détracteurs du projet évoquaient souvent la pollution, la possibilité d'accidents écologiques et le risque pour le Canada d'entacher sa réputation internationale en menant une action incompatible avec le traité de non-prolifération. Les retombées économiques du projet étaient considérées par ses promoteurs comme une bénédiction pour l'économie du pays, alors que ses opposants trouvaient beaucoup d'autres options bien plus valables.

Les témoignages formulés par des représentants du MDN, pendant les audiences de la Chambre des Communes à Ottawa, ont permis de mieux définir les arguments énoncés dans le Livre blanc. Ce point de vue officiel, qui s'inscrivait dans le programme du Parti conservateur, trouva écho chez plusieurs spécialistes d'instituts de stratégie et, à l'occasion, dans les rubriques de libres opinions de la presse écrite. Par ailleurs, le projet provoqua des réactions différentes chez d'autres Canadiens et Canadiennes. Les deux partis d'opposition se prononcèrent contre l'acquisition des SPN, de même que divers organismes tels que le *Centre canadien pour le contrôle des armements et le désarmement* (CCCAD), *l'Institut Nord-Sud*, le *Conseil des églises du Canada*. En outre, des personnalités jouissant d'une cote d'écoute élevée auprès du public ne manquèrent pas d'exprimer leur désaccord à titre individuel.

En tout état de cause, deux facteurs ajoutèrent beaucoup à la confusion. D'une part, le ton du Livre blanc, très idéologique et qui portait surtout sur la confrontation Est-Ouest, suscita des réactions négatives valables, du fait que ceux qui les exprimèrent s'opposaient à l'attitude du ministre de la Défense nationale, mais à la fois discutables

lorsque ces mêmes personnes s'en prenaient aussi à la mise en service des SPN. D'autre part, le *label nucléaire* avait provoqué chez certains un rejet en bloc, ce qui contribua encore davantage à fausser le débat. Le gouvernement avait eu une autre option avant 1987, soit celle d'acquérir quatre sous-marins à propulsion conventionnelle, au prix de 1,6 millard de dollars, et huit autres frégates (7 milliards de dollars); or, même si cette option était aussi coûteuse que l'option nucléaire, elle n'avait guère fait de vagues.

Lors de la réélection du parti conservateur en novembre 1988, le projet d'acquisition de sous-marins nucléaires, mis sur la glace durant la période préélectorale, reprit de la vigueur puis, à la surprise de beaucoup, fut annulé dans un contexte de contraintes budgétaires, par ce même gouvernement qui avait élaboré, présenté et défendu ce projet. Cette décision nécessite la réouverture du dossier de l'acquisition de sous-marins conventionnels.

2. LE CONTEXTE TECHNOLOGIQUE

2.1. Du submersible au sous-marin

Tout sous-marin doit transporter la source d'énergie qui lui est nécessaire pour fonctionner et se déplacer en plongée, car il n'est alors plus en contact avec l'air atmosphérique. A l'aube de la Deuxième Guerre mondiale, la seule source d'énergie utilisable dans ces conditions était l'énergie électrique, sous forme d'un ensemble de batteries encombrantes limitant l'autonomie et la vitesse du sous-marin en plongée. En surface, de nouveau en contact avec l'atmosphère, le sous-marin recourait au moteur diesel pour assurer sa propulsion et redevenait alors pleinement autonome et assez rapide pour rejoindre et distancer non pas des unités de surface mais tout au moins des convois ennemis.

Autre facteur de limitation de la performance d'un sous-marin en plongée : la différence de forme optimale du bâtiment selon qu'il effectue des opérations de plongée ou des opérations de surface. Le transit entre deux positions devant se faire en surface pour gagner du temps, la recherche d'une bonne performance en surface était alors contradictoire avec l'amélioration de la performance du sous-marin en plongée. Encore à cette époque, les ancêtres des sous-marins actuels méritaient plutôt le nom de «submersibles», la plupart du temps en surface et capables à l'occasion de rester submergés à vitesse réduite durant un temps relativement court.

Les Allemands firent un premier pas vers la mutation du submersible en sous-marin en introduisant le *schnorchel*, ce qui a permis au bâtiment de fonctionner au diesel, en immersion périscopique, avec un système d'aspiration et de refoulement d'air au ras des vagues. Cette nouvelle aptitude des sous-marins à rester longtemps submergés fournit aux ingénieurs allemands l'occasion de leur donner de nouvelles lignes, beaucoup plus adaptées à une haute performance en plongée. Dès lors, les sous-marins ont présenté un profil très différent. Dix ans plus tard, soit en 1954, le lancement aux États-

Unis du sous-marin à propulsion nucléaire *Nautilus*, annonçait la mutation du submersible en véritable sous-marin.

La source d'énergie y était pour la première fois constituée d'uranium qui, à poids égal, produit environ 10^5 fois plus d'énergie accessible que n'importe quel autre combustible chimique. De plus, le combustible agit sans produit oxygénant, de sorte que la propulsion ne nécessite plus le recours à l'atmosphère. Cette indépendance et le système de conditionnement qui regénère l'air du SPN lui donnent une autonomie en immersion qui n'est limitée que par l'endurance de l'équipage.

2.2. Le sous-marin dans l'océan

Le sous-marin est assujetti à desntraintes très strictes et mutuellement contradictoires. A cause de sa structure très intégrée, il est presque impossible d'en modifier une composante sans influer sur les autres parties du système et sur son agencement général. De cet ensemble de contraintes se dégage une relation de proportionnalité entre la puissance à l'hélice (P) du bateau et le cube de la vitesse (V^3); en d'autres mots, le rapport P/V^3 reste constant pour un sous-marin de dimensions données. Ainsi, des puissances de propulsion très modestes suffisent pour assurer de basses vitesses (par exemple, quatre à huit noeuds), tandis que pour obtenir un accroissement sensible de la vitesse, on doit augmenter considérablement la puissance à l'hélice (par exemple, pour passer de vingt-cinq à trente-cinq noeuds, il faut tripler cette puissance).

Autre caractéristique essentielle du sous-marin en plongée: son environnement est l'eau de mer dans laquelle il navigue. Cette eau arrête presque complètement les radiations électromagnétiques. Par contre, le son se propage fort bien mais beaucoup plus lentement dans l'eau, à des fréquences nettement plus basses. Contrairement au satellite ou à l'avion qui évoluent dans un monde électromagnétique caractérisé par la vitesse et la précision, le sous-marin se meut dans un monde d'ondes sonores, où tout

est lent, vague et ambigu. Pour garder au sous-marin l'atout de la dissimulation, il faut le doter de la structure la plus silencieuse possible.

La propagation du son dans l'eau dépend de la pression et de la température du milieu. Alors que la pression augmente de manière continue avec la profondeur, la température est extrêmement variable dans tous les plans, si bien que toutes sortes de phénomènes se produisent, défiant nos habitudes du son dans l'atmosphère. Ainsi, les «thermoclines» (limites entre les couches d'eau chaude et d'eau froide) réfléchissent le son un peu comme un miroir le fait avec la lumière; un son peut se trouver piégé dans un chenal sonore et se propager sur plusieurs centaines de kilomètres sans amortissement notable.

Les bruits de fréquences diverses émis par un sous-marin, au milieu d'autres sources sonores telles que les navires de surface, les vagues, les organismes marins, les glaces, etc., le rendent repérable et identifiable. Le bruit est l'ennemi du sous-marinier.

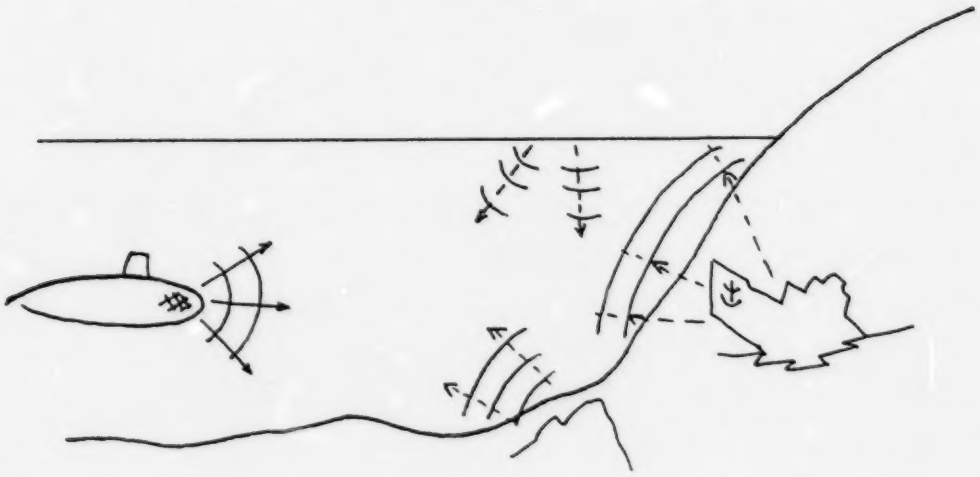
La nature des bruits dépend de la partie du bâtiment qui les engendre : vibrations des machines, cavitation sur les pales de l'hélice en mouvement, et flux turbulent créé par l'eau de mer au passage du sous-marin. Les machines, qui causent des bruits à des bandes de fréquences étroites, sont la principale source sonore à vitesses relativement basses, c'est-à-dire avant que la cavitation de l'hélice commence. Il y a cavitation quand l'hélice tournant à haute vitesse s'éloigne de l'eau avoisinante plus rapidement que celle-ci peut suivre. De nombreuses bulles se forment alors, s'agrandissent jusqu'à ce qu'elles atteignent leur taille maximale, puis implosent bruyamment. Ces bruits sont les plus détectables de tous ceux que produisent les sous-marins modernes naviguant à vitesse relativement élevée à de faibles profondeurs. L'adoption d'hélices de grand diamètre, tournant plus lentement, diminue la cavitation. Par ailleurs, plus le sous-marin descend en profondeur, plus la pression de l'eau augmente, ce qui rend la cavitation moins probable.

Pour détecter l'ennemi avant d'être lui-même repéré, le sous-marin doit, tout en faisant le moins de bruit possible, disposer du meilleur système d'écoute possible (Figure 1). Les moyens existants pour détecter un SPN immergé sont les suivants : i) l'écoute *passive* par hydrophone (microphone sous-marin) pour capter les ondes sonores émises par les sources de bruit mentionnées plus haut; le sous-marin ainsi repéré ignore qu'il a été détecté, et la position des hydrophones reste inconnue; ii) l'écoute *active*, assurée par un sonar qui génère une onde sonore et écoute l'écho renvoyé par la coque du sous-marin. Le sonar actif est ainsi analogue à un radar, à ceci près qu'il envoie et reçoit des ondes acoustiques dans l'eau plutôt que des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère. Le sonar actif peut donc détecter un sous-marin même parfaitement immobile, mais ce dernier sait alors qu'il a été repéré. Pendant plusieurs années encore, les sous-marins continueront de recourir principalement à l'écoute passive pour détecter leurs congénères. Il existe des hydrophones (et des ensembles d'hydrophones) et des sonars de tailles diverses placés au fond des océans, à bord des sous-marins, sur des bouées ou encore des navires de surface.

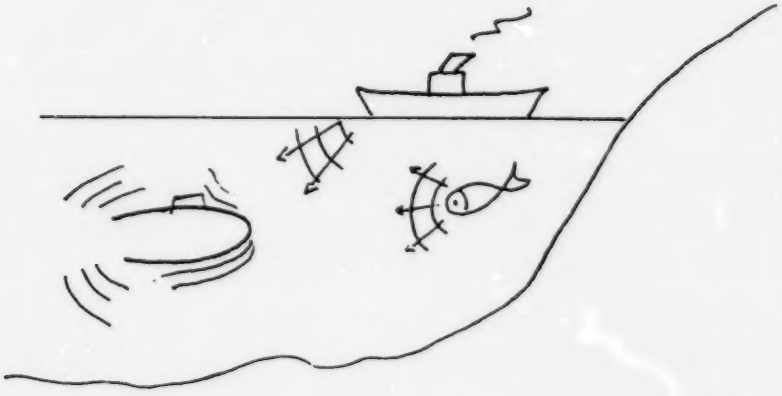
La détection des sous-marins par des moyens acoustiques nécessite une technologie informatique très sophistiquée. Le problème est difficile car non seulement l'océan est bruyant, mais les ondes sonores suivent des trajectoires aux courbures les plus inattendues. Une fois captés par une série d'hydrophones, les sons provenant d'un sous-marin sont transformés en signaux lumineux traités par ordinateurs et examinés en regard d'une liste de spectres connus comme caractéristiques de sous-marins déjà catalogués. Ainsi, chaque quantité d'énergie sonore émise par un sous-marin est perçue comme un point de scintillation verdâtre sur le terminal d'ordinateur dans la salle des sonars : le sous-marinier n'entend pas les sons, il les voit. Il les entend toutefois d'une certaine manière, puisque les sons sont aussi reconstitués, méthode complémentaire pour mieux identifier la source du bruit détecté.

Figure 1

a) Sonars actifs et réflections des ondes sonores



b) Sources de bruits



2.3. Propulsion

2.3.1. Le SPN à toute vapeur

Le SPN est en quelque sorte une machine à vapeur, l'eau de la chaudière étant chauffée par la source thermique pratiquement inépuisable que constitue la fission de l'uranium (éclatement du noyau d'U^{235} en fragments de fission, en énergie et en neutrons), plutôt que par du charbon comme dans les locomotives d'antan. L'énergie de la vapeur engendrée par le réacteur est transférée à l'hélice par le système dit de propulsion. L'ensemble réacteur-système de propulsion occupe presque toute la moitié arrière du bâtiment. La filière nucléaire utilisée à bord des SPN, dite à eau sous pression, comprend le réacteur, le pressuriseur et le générateur de vapeur (Figure 2). La cuve du réacteur contient le combustible fait d'un mélange d'U^{238} et d'U^{235}, enrichi en U^{235}, à des degrés divers. Au repos, des barres de contrôle empêchent la fission de s'amorcer dans le réacteur. Le retrait progressif de ces barres permet à la réaction en chaîne d'atteindre son régime de croisière : les neutrons émis par une fission vont provoquer à leur tour d'autres fissions des noyaux voisins d'uranium et, par réaction en chaîne, provoquer ce qu'il est convenu d'appeler l'état critique. L'eau qui circule dans ce réacteur a deux rôles : au niveau macroscopique, elle assure le transfert de chaleur entre le coeur (où se produit la réaction en chaîne) et le système de propulsion; au niveau microscopique, les noyaux d'hydrogène qu'elle contient provoquent le ralentissement des neutrons de haute énergie libérés par la fission, ce qui rend ces derniers plus aptes à provoquer d'autres fissions et favorise l'établissement de l'état d'équilibre désiré.

Pour remplir ces deux fonctions convenablement, l'eau doit rester sous forme liquide. Elle est donc maintenue sous pression, de manière à atteindre des températures élevées (250° C environ) tout en restant liquide grâce à un pressuriseur. L'eau circule en circuit fermé (le circuit primaire); elle est pompée jusqu'à des échangeurs de chaleur qui produisent la vapeur nécessaire à l'entraînement des turbines. Cette eau, rendue

radioactive par son contact avec le coeur du réacteur, n'en quitte pas le compartiment (Figure 2). La compacité, essentielle pour l'intégration du réacteur à un SPN, s'obtient aussi par l'utilisation d'uranium très enrichi en U^{235} (95 p. 100 dans les réacteurs américains et britanniques, 10 p. 100 dans les réacteurs français) alors que l'enrichissement d'un réacteur civil est en général d'environ 3 p. 100 et celui d'un explosif nucléaire de 93 p. 100.

Les trois caractéristiques du SPN -- combustible pratiquement inépuisable, haute vitesse sur de longues distances et grande autonomie en immersion -- lui confèrent des qualités stratégiques et tactiques tout à fait nouvelles. Le SPN bénéficie d'une véritable mobilité stratégique: il peut passer inaperçu d'un point du globe à un autre, en conservant une vitesse moyenne de vingt-cinq noeuds, et opérer sous la glace. Tactiquement, il peut rivaliser de vitesse avec n'importe quel navire de surface ou encore attendre, autonome et solitaire, le passage de sa proie dans une zone donnée. Muni d'un système de combat (armement et hydrophones) et libéré des contraintes (allant de pair avec des batteries encombrantes et une puissance limitée), le SPN voit croître son rôle de chasseur de sous-marins. Finalement, son autonomie et sa haute vitesse en immersion en font un bâtiment beaucoup moins vulnérable face à une flotte de surface adverse.

2.3.2. Sous-marins diesel-électriques (SS)*

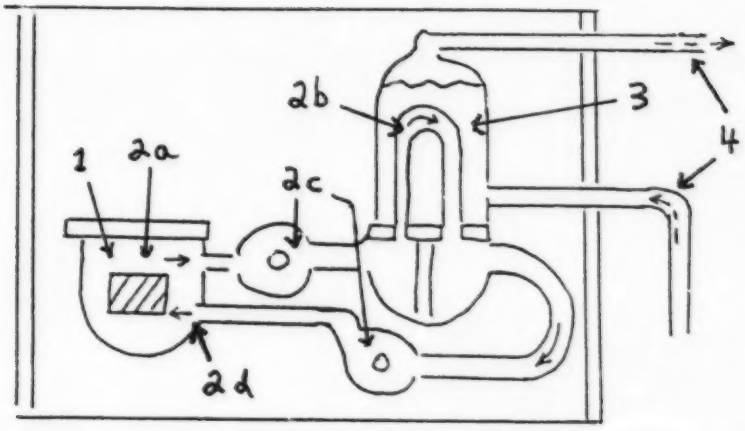
La mise en service de SPN par les superpuissances, l'Angleterre, la France et la Chine n'a pas arrêté la production des sous-marins conventionnels. Plusieurs pays de l'Europe de l'Ouest tels que l'Italie, la Suède, la Hollande et l'Allemagne s'y consacrent avec succès. Ces pays sont dotés de marines qui opèrent dans des mers de taille réduite et n'ont pas véritablement de vocation océanique : leur choix n'est pas tant dicté par un problème technologique que par des considérations géographiques.

---

* Les initiales SS désignent les sous-marins diesel-électriques en général, selon des conventions en vigueur dans la Marine américaine (et beaucoup d'autres). Les initiales SSK plus souvent utilisées dans ce travail désignent (selon les mêmes conventions) ces mêmes sous-marins dans leur rôle de lutte anti-sous-marine.

Figure 2

Réacteur nucléaire naval



1. Coeur du réacteur
2. ⟶ Trajet emprunté par l'eau dans le circuit primaire
   - 2. a) L'eau s'éloigne du coeur
   - 2. b) L'eau communique de la chaleur au circuit secondaire
   - 2. c) Pompes forçant le mouvement de l'eau
   - 2. d) L'eau retourne vers le coeur
3. Échangeur de chaleur
4. - - → Trajet (partiellement montré) du mélange vapeur-liquide dans le circuit secondaire

De fait, les SS sont moins chers que les SPN, ils sont plus simples à manoeuvrer et n'exigent qu'un équipage relativement peu nombreux. Néanmoins, dans le mode de propulsion diesel-électrique, la capacité du SSK de rester immergé est intrinsèquement limitée, vu la capacité de charge restreinte des batteries et le besoin d'un agent oxygénant pour la combustion.

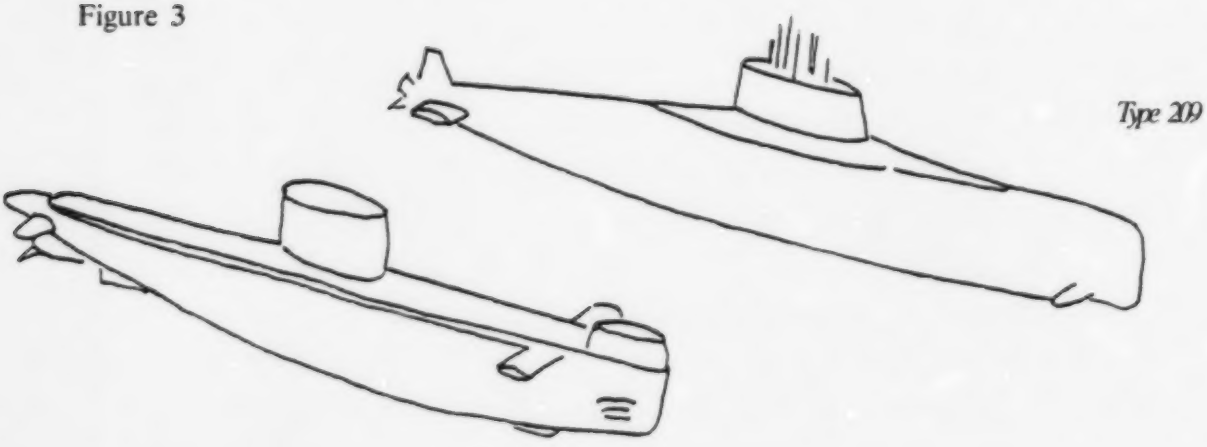
Le premier trait caractéristique d'un SSK est son autonomie en plongée. Celle-ci décroît rapidement avec la vitesse, non seulement à cause de la relation entre la puissance déployée par le sous-marin à l'hélice et sa vitesse mais également à cause de la réduction de la capacité de la batterie venant d'un courant de décharge accru. Le Tableau 1 illustre les autonomies en fonction des vitesses de l'*Oberon*, de type relativement ancien et du type *209* allemand. On observe la décroissance rapide de l'autonomie avec la vitesse pour chacun des deux bateaux et une bien meilleure performance du type *209* plus caractéristique des sous-marins modernes. La comparaison entre les deux sous-marins montre que la coque du sous-marin allemand est beaucoup plus lisse, ce qui entraîne un coefficient de résistance hydrodynamique au mouvement dans l'eau beaucoup plus faible et donc plus favorable. (Figure 3)

Après une manoeuvre imposant une grande vitesse, les batteries du SSK sont souvent déchargées à un point tel qu'il devient urgent de les recharger. Aussi le temps requis pour recharger complètement les batteries tout en se maintenant à des vitesses de patrouille est-il une caractéristique importante du SSK. Un autre trait du SSK est le «taux d'indiscrétion», fraction du temps durant lequel le sous-marin utilise ses moteurs diesel pour recharger ses batteries. Pour un sous-marin moderne, le taux d'indiscrétion est d'environ 10 p. 100 à 5 noeuds, 25 p. 100 à 10 noeuds, 50 p. 100 à 13 noeuds.

Tableau 1

Vitesse (noeuds)	Endurance (heures)	
	209	*Oberon*
22	1.0	
20	1.55	
16	3.75	1.0
14	6.3	1.66
10	18.2	7.0
8	32.7	11.0
6	60.0	17.0

Figure 3



Oberon

Lorsque le SS fonctionne sur ses batteries, l'absence de rouages de transmission rend la propulsion très silencieuse et le SS très difficile à détecter. Par contre, il est très détectable quand il fonctionne au diesel car ce moteur engendre des sons assez intenses. Le *schnorchel* peut être repéré par radar et les gaz d'échappement peuvent être détectés par des «renifleurs» chimiques placés à bord d'avions. C'est pourquoi la décision de remonter ou non en surface est toujours présente pour un commandant de SS. Ce dernier doit constamment se demander comment économiser l'énergie disponible du SS, alors qu'un commandant de SPN se demande comment dépenser au mieux l'énergie de son bâtiment. Un SPN peut aller à toute vitesse en deça de sa vitesse maximum; néanmoins, en patrouille la plupart du temps, sa vitesse se limitera à environ 10 noeuds pour rester silencieux, quitte à passer à la vitesse maximale si nécessaire.

Une brève revue des progrès techniques des dernières années montre à la fois la vitalité et les limites de la propulsion diesel-électrique. L'automation de plus en plus poussée a permis de réduire les équipages parfois de moitié (29 membres d'équipage pour le *TR 1700* en comparaison de 64 pour l'*Oberon*). De nos jours, les coefficients de frottement hydrodynamique des SS modernes ont atteint un plateau; les batteries, lourdes et encombrantes, prennent de 20 à 25 p. 100 du poids du sous-marin. Malgré les progrès de l'après-guerre, les batteries offrent toujours un rendement poids-énergie assez réduit, ce qui nous amène à considérer des techniques de propulsion plus récentes.

Des essais de quantification ont mené certains auteurs à considérer qu'un SPN équivaut à trois SSK. Cette estimation (qui traduit plus ou moins le fait que le SPN est un bâtiment de mouvement alors que le SSK en est un de position) est commode pour établir des comparaisons entre les coûts, les équipages et les infrastructures correspondantes des SPN et des SSK. (On s'attendrait alors à ce que ces coûts, équipages et frais d'infrastructure soient aussi dans le rapport 3/1). Cependant, cette numérologie, basée sur les limitations opérationnelles des SSK par rapport aux SPN dépend crucialement, dans chaque cas d'espèce, de la nature du théâtre d'opérations (Arctique ou mer côtière), de la distance de ce théâtre d'opération à la base des sous-

marins, de l'intensité de l'opposition adverse (patrouille dans des eaux amies ou hostiles), et de l'utilisation du sous-marin (surveillance ou combat).

2.3.3. Hybrides

Cherchant à obtenir une autonomie plus grande en immersion, sans passer par la propulsion nucléaire, les concepteurs de SSK ont essayé de créer des systèmes de propulsion indépendants de l'air (PIA), c'est-à-dire capables de se déplacer en immersion pendant une période très longue, ce qui les a conduits à l'étude et au développement d'une solution hybride : un système de propulsion conventionnel, qui pourrait assurer des vitesses de pointe pendant de courtes périodes et un système de PIA auxiliaire, pour les vitesses réduites et moyennes maintenues pendant des périodes prolongées. Pourvu d'un tel ensemble de systèmes, un sous-marin diesel en patrouille, tout en fonctionnant à vitesse réduite, jouirait d'une autonomie accrue en immersion. Cette autonomie lui permettrait de se consacrer à sa mission de surveillance sans avoir à l'interrompre en remontant pour utiliser son *schnorchel* afin de recharger ses batteries.

Par ailleurs, les vitesses élevées (20 noeuds et plus) que peuvent se permettre les SPN se situent au-delà de leur vitesse acoustique et donc empêchent les systèmes de détection de fonctionner efficacement. Les vitesses de 10 à 12 noeuds, raisonnables pour des déplacements océaniques et en deça de la vitesse acoustique, ne sont praticables par les sous-marins conventionnels qu'au prix d'un taux d'indiscrétion élevé; par contre, des systèmes de PIA considérés actuellement permettraient de telles vitesses en même temps qu'un taux d'indiscrétion minimal.

Dans leur effort pour réduire l'écart entre la performance des SPN et des SSK, les concepteurs doivent tenir compte de plusieurs contraintes limitant les options technologiques possibles : i) le système de PIA doit être basé sur une technologie éprouvée; ses dimensions doivent être telles que son incorporation dans la structure du sous-marin ne perturbe pas les autres composantes du bâtiment; ii) le système ne doit pas introduire de nouvelles sources d'énergie sonore ou autres qui rendent le sous-marin

plus repérable; iii) les complications et le supplément de prix introduits doivent rester inférieurs à ce qu'exigerait l'installation d'un système à propulsion nucléaire traditionnel.

Trois systèmes hybrides semblent sur le point d'arriver à une certaine maturité technologique; d'une part, deux technologies non nucléaires basées sur le moteur Stirling (Suède) et sur les piles à combustible (Allemagne) et, d'autre part, une technologie basée sur les mini-réacteurs nucléaires que développe la société *Energy Conversion System*, au Canada. Une quatrième option, misant uniquement sur la technologie diesel en circuit fermé, est étudiée en Allemagne, en Hollande et en Italie. Par ailleurs, deux sociétés, *Ballard Technologies* au Canada et *Siemens* en République fédérale allemande, travaillent sur les piles à combustible et sur leurs applications à la propulsion sous-marine.

Pour l'instant, aucun système de PIA n'est pleinement opérationnel à bord d'un sous-marin. Les travaux de recherche et de développement ont débuté au début des années 1980 et de tels systèmes devraient être mis en service à partir des années 1995.

Moteur diesel à cycle fermé -- Un moteur diesel marin normal est à «cycle ouvert» en ce sens qu'il est en contact direct avec l'atmosphère, utilisant l'oxygène pour entretenir la combustion et l'azote comme fluide conducteur de chaleur. L'idée d'utiliser un «cycle fermé» pour les moteurs diesel dans les sous-marins date de 45 ans : l'oxygène nécessaire est entreposé dans le bâtiment et le contact du moteur avec l'atmosphère est supprimé; les gaz d'échappement sont recyclés à l'entrée du moteur, avec une addition d'oxygène qui entretretient la combustion et de gaz inerte jouant ainsi le rôle de l'azote de l'air. Cette option a été longtemps jugée problématique à cause de la limitation de la profondeur en plongée qu'elle impose : alors qu'un moteur à combustion fonctionne normalement à pression constante, la pression de la mer ambiante, qui augmente rapidement avec la profondeur (10 atmosphères par 100 mètres de fond) exige que les gaz d'échappement soient portés à une pression suffisante pour être expulsés du bateau (ou gardés à bord) par un mécanisme quelconque.

En comparaison des autres systèmes hybrides disponibles, l'utilisation des moteurs diesel s'appuie sur une technologie éprouvée et bien connue. Par ailleurs, leur mode de combustion bruyant pose des problèmes d'insonorisation difficiles à résoudre.

Depuis 1986, la compagnie allemande *Thyssen Nordseewerke (TNSW)* et la compagnie hollandaise *Rotterdamse Droogdon Mij (RDM)* exploitant indépendamment une percée technologique réalisée en Angleterre qui règle élégamment le problème d'évacuation des gaz d'échappement, développent un système Diesel pouvant fonctionner alternativement en cycle ouvert et fermé. Des essais sur un système de 120 kw pour *TNSW* (et de 150 kw pour *RDM*) sur terre ferme, simulant les conditions d'immersion, sont en cours. Un prototype de 500 kw est actuellement à l'étude dans les laboratoires de *RDM*.

TNSW et *RDM* travaillent actuellement à l'applicabilité d'un tel système à la propulsion de sous-marin, l'un des problèmes les plus ardus étant la diminution de rendement due au système d'évacuation des gaz d'échappement, l'autre étant le niveau élevé du bruit. Les compagnies prévoient que l'ajout de ce système fournirait par exemple une autonomie de plus de deux semaines à une vitesse de 7 noeuds à un sous-marin de 2 000 tonnes, ces nombres dépendant évidemment d'autres paramètres (la capacité des conteneurs d'oxygène ajoutés par exemple). Des essais en mer par *TNSW* ne sont pas encore prévus, à notre connaissance. Par contre, *RDM* compte tester son système sur le *Zeehond*, un sous-marin récemment retiré du service par la Marine hollandaise.

La compagnie *Maritalia*, qui a adapté plusieurs moteurs diesel au cycle fermé, mise sur un concept tout à fait nouveau, l'entreposage de l'oxygène sous forme gazeuse dans des tuyaux circulaires soudés ensemble et formant la coque. Ce système fut surnommé *GST* (Gaseous Storage in a Toroïdal Hull). Le combustible diesel est alors véhiculé dans des réservoirs ordinaires. Au fur et à mesure de son utilisation, l'oxygène est remplacé dans les réservoirs par les gaz d'échappement formés. N'étant donc pas rejetés à la mer, ils ne laissent pas de traces qui rendraient le sous-marin repérable. De plus, le

renforcement de la coque que présente cette enveloppe torique permet une plus grande profondeur maximale et, selon les promoteurs du projet, tend à étouffer les bruits émis par le moteur diesel.

Deux sous-marins de petit tonnage (120 tonnes en 1978 et 80 tonnes en 1982) ont été construits à titre expérimental selon ces concepts. Le premier petit sous-marin militaire opérationnel, le *3GST9* (3 pouces de diamètre pour les tores et de 9 à 9,99 mètres pour la longueur du bâtiment) a été soumis à des essais en mer en 1988. Ce «midget», d'une trentaine de tonnes, a une portée de 200 milles nautiques à 8 noeuds. *Maritalia*, maintenant associé à *Fincantieri*, a commencé à élaborer les plans d'un sous-marin plus grand, le *20GST48* qui devrait mener à une autonomie de 4 000 milles marins à 8 noeuds ou 8 000 milles marins à 5 noeuds.

Moteur Stirling -- Dans les moteurs à essence ou diesel qui nous sont familiers, l'énergie mécanique est fournie par le mouvement de pistons directement engendré par les variations de pression dues à la combustion du mélange air-essence. Ces gaz de combustion sont ensuite évacués (ce qui donne lieu d'ailleurs à une pollution importante). Ce type de combustion dite «interne» est discontinue et généralement incomplète. Dans le moteur Stirling par contre, le fluide qui provoque le mouvement des pistons (air, hydrogène ou hélium) n'est pas sujet à une combustion, il reste dans une enceinte fermée et chauffée par une source extérieure à l'enceinte (oxygène liquide et carburant diesel, par exemple), d'où le nom de combustion «externe» donné à ce type de moteur. Ce sont les variations de température et donc de pression de ce gaz qui engendrent l'énergie mécanique. L'absence des soupapes d'admission et d'échappement rend le moteur Stirling extrêmement silencieux. La combustion se produisant à haute pression (de vingt à trente bars), il n'y a pas lieu de comprimer, lorsque la profondeur n'excède pas 200 à 300 mètres, les gaz d'échappement avant leur expulsion du bateau. Les difficultés rencontrées dans le développement de moteurs de hautes puissances semblent résider dans l'obtention de matériaux d'une étanchéité satisfaisante.

Kockums Marine AB, en Suède, travaille à la mise au point et à l'adaptation d'un système de propulsion sous-marine, avec l'appui du gouvernement suédois, comprenant un moteur diesel rechargeant les batteries en surface, une batterie plomb-acide pour haute vitesse en immersion et un moteur Stirling de basse puissance (75 kw) et haute autonomie. Les points forts de ce système sont une haute densité d'énergie associée à l'oxygène liquide et au carburant diesel ainsi que le silence d'opération. C'est en septembre 1988 que *Kockums* a commencé des essais en mer impliquant le système Stirling complet sur le *Näcken* , un sous-marin de 1100 tonnes, rallongé ainsi d'une huitaine de mètres. Les essais, sur une période d'un an, ont montré que l'autonomie du *Näcken* passait d'environ 2 jours à 2 semaines en immersion. Le Stirling pourrait alors être adapté au prochain sous-marin de la Marine suédoise, le *A-19* qui doit être mis en service dans les années 1990. Par ailleurs, la Marine australienne considère l'option Stirling pour ses sous-marins d'origine suédoise *Type 471*.

Piles à combustible -- La pile à combustible est essentiellement un appareil qui engendre du courant à partir de la combinaison d'hydrogène et d'oxygène, ou plus généralement de carburant et d'oxydant. Le concept, datant de 140 ans, a donné lieu à des réalisations dans le domaine spatial en 1958. C'est seulement dans les années 1980 que des applications navales ont été considérées. L'efficacité des piles à combustible dépasse celle des batteries; silencieuses, elles ne nécessitent pas de pièces de rotation ni de gaz d'échappement, mais les deux composantes de la réaction doivent évidemment être entreposées dans le sous-marin. Les piles à combustible alcalines fonctionnant à basse température, utilisent de l'hydrogène entreposé dans le bâtiment sous la forme d'hydrure métallique. D'autres types de piles à combustible, fonctionnant à des températures plus élevées, utilisent de l'hydrogène contenu dans un combustible (méthanol, etc.) purifié de produits qui endommagent la pile (oxide de carbone, soufre, etc.). Plusieurs années de recherche et de développement seront nécessaires pour que ces systèmes (à carbonate fondu, à membrane, etc.) deviennent opérationnels à bord d'un sous-marin.

En 1980, un consortium allemand a commencé à développer un système de piles à combustible alcalines, conçu par *Siemens*, et adapté à un environnement sous-marin; plus tard en 1983, un système couplé de type conventionnel et à pile à combustible a été testé au sol. En 1987, le sous-marin *U-1* de *Type 205* a été muni d'un de ces systèmes au cours d'un carénage : il a été soumis à une période d'essais en mer d'une dizaine de mois pour le compte de la Marine allemande. Si les essais sont concluants, la pile à combustible à membrane pourrait être incorporée dans la prochaine génération de sous-marins allemands -- *Type 212* (1 400 tonnes) -- qui doivent remplacer les SS *205* et *206* dans les années 1990.

Hybride nucléaire -- Le combustible nucléaire a non seulement un rapport énergie/masse très supérieur à tout combustible chimique, il est aussi indépendant de l'air, en ce sens que l'oxygène ne lui est pas nécessaire pour sa combustion. Aussi, une option hybride peut-elle se baser sur la combinaison diesel-batteries -- réacteur nucléaire. Il ne s'agit plus d'un réacteur de 10 Mwe et plus, fournissant autonomie illimitée et grandes vitesses au bâtiment mais d'un mini-réacteur de 1 à 2 Mwe assurant une autonomie illimitée à vitesses réduites. Ces mini-réacteurs compenseraient leur puissance modeste par une plus grande simplicité de fonctionnement d'où une sécurité et un entretien plus faciles à assurer.

Le groupe canadien *Energy Conversion System (ECS)* travaille sur un tel programme d'adaptation d'une source d'énergie nucléaire à la propulsion navale (Autonomous Marine Power Source -- AMPS). Jusqu'ici, les études techniques se sont concentrées sur deux puissances différentes : un ensemble de 100 kw (AMPS 100) et un autre de 1700 kw (AMPS 1000) qui seraient respectivement adaptables à des sous-marins de 1 000 et 2 000 tonnes. L'AMPS 1000 permettrait d'atteindre une vitesse de 12 noeuds pour un bateau de 2 000 tonnes opérant à indiscrétion nulle. Le programme est maintenant dans sa cinquième année et pourrait, en principe, arriver à sa maturité vers les années 1995. En avril 1989, les chantiers navals *RDM* de Hollande (et *Vickers* du Royaume-Uni) ont passé un accord avec *ECS* pour entamer des études sur l'incorporation

d'un système AMPS dans le sous-marin *Walrus* (et le *Upholder 2400*). L'intérêt canadien pour les petits réacteurs s'est développé depuis une vingtaine d'années, avec le lancement du concept «Slowpoke» par l'*Énergie atomique du Canada (EACL)*. Il est à noter que l'utilisation d'un petit réacteur (batterie nucléaire) comme moteur hybride auxiliaire indépendant de l'air dans un sous-marin diesel, était à l'étude par l'*EACL* jusqu'au moment où le Canada a opté (provisoirement) pour des SPN.

D'autres pays se sont intéressés, à l'occasion, à la pertinence de petits réacteurs nucléaires pour la propulsion navale. La Marine américaine a lancé, en 1969, le submersible de recherche *NR-1*, basé sur un réacteur de faible puissance. La Marine soviétique a fait de même en 1983 avec le modèle «X-Ray». En France, *Technicatome* a dessiné un petit réacteur, version simplifiée du réacteur à eau pressurisée en service sur les SPN français.

Problèmes d'espace et de poids -- Tous les sous-marins ayant un système auxiliaire indépendant de l'air doivent transporter le combustible de ce système auxiliaire, ce qui nécessite une surimposition de volume et de poids au bâtiment ainsi qu'une infrastructure additionnelle suivant la nature du combustible ajouté. Les éléments clé de la performance d'un hybride sont d'une part, la densité du combustible et de l'oxydant ainsi que leur densité d'énergie et d'autre part, la capacité du système à transformer cette énergie entreposée en énergie mécanique.

De ce point de vue, un réacteur fonctionnant à partir d'un combustible nucléaire a, en principe, une densité d'énergie très supérieure à celle de tout combustible chimique, permettant au bâtiment une autonomie beaucoup plus élevée tout en exigeant une augmentation de tonnage raisonnable (qui vient surtout des écrans protecteurs entourant le mini-réacteur). Par ailleurs, l'idée d'emmagasiner l'oxygène nécessaire au cycle diesel fermé dans un réservoir en forme de tore constituant la coque révolutionne en quelque sorte le problème du stockage de l'oxydant, puisque le bateau ainsi équipé contient beaucoup plus d'espace disponible qu'un sous-marin diesel-électrique traditionnel.

2.4. L'évolution des technologies

Les différentes technologies qui viennent d'être évoquées, afférentes à la détection, au silence et à la propulsion, se mesurent à deux échelles de temps bien distinctes.

Vu la complexité des réacteurs, la durée moyenne de vie utile du sous-marin (trente ans) et le milieu difficile dans lequel il doit évoluer, un conservatisme assez rigide est de règle dès l'adoption du concept concernant le réacteur, le système de propulsion et la coque. «*Quand on a quelque chose qui marche, on s'y tient*». Ainsi, une fois choisies ces composantes essentielles, l'évolution de la technologie se fera par améliorations successives, dans le cadre d'une tradition, sur une période allant de vingt-cinq à trente ans. Par contre, les composantes du système de combat et certaines techniques d'isolement acoustique changent d'un bateau à l'autre, voire d'un carénage à l'autre. Il existe bien entendu un lien entre la taille (et donc l'espace disponible) d'un bateau et sa capacité d'embarquer des systèmes d'armements volumineux. Les réacteurs nucléaires américains, choisis sous la direction de l'amiral Rickover (voir description dans la section 2.3.1 et la Figure 2), nécessitaient un espace considérable; comme leur taille déterminait la section minimale de la coque, les premiers SPN américains furant grands, comparativement aux SSK. Pour tirer parti de la propulsion nucléaire, on rendit les SPN le plus silencieux possible et on les munit des meilleurs systèmes de combat et de détection. Le réacteur et le système de transmission à l'hélice, intrinsèquement bruyants, dûrent être assortis d'un système complexe d'amortisseurs de sons; par ailleurs, comme il fallait des sonars et des armements toujours plus sophistiqués et nombreux, la taille des bâtiments a grandi également. C'est ainsi que les États-Unis ont mis en service des SPN de plus en plus volumineux et chers, depuis le *Skipjack* (3 500 tonnes) jusqu'à la classe du *Los Angeles* (7 000 tonnes); cette tendance s'est répétée en Grande-Bretagne, depuis le *Dreadnought* (3 000 tonnes), dont le dessin du réacteur avait été emprunté aux États-Unis en 1959, jusqu'au *Trafalgar* (5 200 tonnes), la course aux grands tonnages étant plus modeste en Angleterre, du fait de budgets plus restreints.

Après avoir tenté à maintes reprises de lancer un SPN et après que les États-Unis eurent refusé d'abord de leur fournir de l'uranium enrichi, puis de leur vendre un réacteur, les Français, avec la société *Technicatome*, ont développé une première génération de réacteurs pour leurs sous-marins stratégiques dans les années 1960, suivie, au début des années 1970, d'une deuxième génération, extrêmement compacts destinés à des SPN plus petits (environ 2 500 tonnes). À cette époque, la France a déployé des efforts considérables pour améliorer la technologie des sonars et des systèmes silencieux, domaine où elle était moins avancée. Par ailleurs, l'avènement de réacteurs extrêmement compacts a rendu possible la mise en service de SPN plus petits, ouvrant la voie à des solutions nouvelles par rapport aux SPN traditionnels. Une comparaison entre le *Trafalgar* (britannique) et l'*Améthyste* (français) qui étaient tous les deux candidats dans le cadre du projet canadien d'acquisition de sous-marins (PCAS), est fournie en annexe.

La tendance aux hauts tonnages que poursuit la marine américaine avec la mise en chantier du *Seawolf* (9 150 tonnes) vient en grande partie du matériel embarqué pour rendre les sous-marins plus silencieux et donc moins repérable par sonars passifs; elle rend aussi le vaisseau plus gros et donc en fait une cible plus étendue pour un sonar actif. Jusqu'à nos jours, et probablement pour plusieurs années encore, les méthodes par détection passive seront dominantes. Cependant, les technologies rendant les sous-marins en opération plus silencieux s'améliorent plus rapidement que les technologies de détection passive qui semblent tendre vers une limite.

L'amélioration constante des qualités de silence caractérise aussi les nouvelles générations de sous-marins soviétiques et européens. Cette question fait l'objet d'un débat aux États-Unis, où la Marine a, depuis plusieurs années, basé ses capacités de lutte ASM sur la haute performance de ses sonars passifs. La question est de savoir à quel point les SPN soviétiques deviendront silencieux et dans quelle mesure les forces ASM américaines pourront continuer à compter sur leur sonars passifs pour les détecter à des distances tactiquement utiles. Le déclin des sonars passifs donne un regain d'importance aux méthodes d'écoute active. Cette dernière approche présente quelques avantages -elle permet de mesurer la distance et la vitesse de rapprochement de la cible, l'onde

de retour des sous-marins ciblés par des sonars actifs de basse fréquence sera difficile à réduire -- Cependant, sa portée est beaucoup plus faible que celle des sonars passifs et son action alerte le sous-marin repéré sur la présence du «chasseur». C'est pourquoi il est encore prématuré d'estimer le rôle à venir des systèmes d'écoute active (ainsi que d'autres techniques non acoustiques). En tout état de cause : i) le déclin des sonars passifs pourrait diminuer le rôle de lutte ASM des sous-marins qui seraient alors affectés à d'autres missions, devenant poseurs de mines, chasseurs de navires de surface, véhicules d'opération de commando, etc.; ii) si les méthodes de détection active prennent le pas sur les méthodes de détection passive, les sous-marins de petite taille bénéficieront d'un nouvel avantage.

Ces missions de nature différente et les nouvelles possibilités technologiques pourraient fort bien amener dans l'avenir une gamme de sous-marins aux structures variées qui succéderaient aux deux grandes classes de sous-marins -- les SPN de plus en plus gigantesques et les SSK plus modestes -- On peut imaginer dans une trentaine d'années, aux côtés des sous-marins à missions multiples déjà connus, des sous-marins dragueurs et poseurs de mines, des sous-marins d'assaut (transportant des troupes de débarquement), des sous-marins de reconnaissance, des sous-marins de défense côtière (voués à la protection des plate-formes pétrolières , par exemple), des sous-marins anti-aériens (équipés de missiles,) etc. Cette différenciation des unités dans le temps se constate d'ailleurs pour toutes sortes d'entités technologiques (ordinateurs, accélérateurs de particules, etc.).

3. L'ACQUISITION DE SOUS-MARINS PAR LE CANADA

La tradition de la Marine canadienne se forgea durant les deux guerres mondiales lors de sa participation à la lutte ASM contre les *U-boats* allemands. Vers la fin des années 1940, devant le coût exorbitant d'une flotte de combat de surface et son faible intérêt stratégique, les responsables de la Marine canadienne décidèrent de s'orienter vers la lutte ASM et de s'en donner les moyens par l'acquisition, entre autres plateformes, de sous-marins*. Cette vocation ne fut pas remise en question pendant la Guerre froide durant les années 1950. L'augmentation des coûts et le plafonnement des dépenses militaires provoqua, à partir des années 1960, une érosion progressive des effectifs de la Marine canadienne.

3.1. Les méandres de la décision canadienne

L'annulation inattendue du projet d'acquisition de sous-marins nucléaires par le Canada, annoncée au cours de la présentation du budget par le ministre des Finances en avril 1989, peut à juste titre laisser planer des doutes sur la logique des processus de décision du gouvernement canadien. Ce manque apparent de suite dans les idées quant à l'acquisition de SPN SPN dès 1952, pour finalement acheter trois sous-marins diesel-électriques de la classe *Oberon*, dont il prit livraison en 1965, n'est pas nouveau. Le Canada avait déjà envisagé d'acquérir des et qui furent essentiellement destinés à l'entraînement à la lutte ASM aérienne et de surface. De fait, plusieurs groupes rattachés à la Marine canadienne avaient réalisé, dans les années 1950, le rôle essentiel des SPN dans la capacité de lutte ASM des forces canadiennes. Ainsi, dès 1958, une recherche sur le type de SPN répondant le plus aux besoins canadiens fut lancée; le

* De nos jours, la lutte ASM est menée par : i) des avions de patrouille maritime, à long rayon d'action, équipés de systèmes de surveillance sous-marine; ii) des navires de surface (frégates, par exemple) parfois porteurs d'hélicoptères; et iii) des sous-marins de patrouille équipés de sonars ou de torpilles.

choix se porta rapidement sur le *Skipjack*. Très rapidement aussi, le coût d'une telle acquisition fit hésiter bien des officiels et la danse de l'hésitation entre diesel et nucléaire commença, comme le démontre l'extrait d'un rapport d'alors : «On préfère les SPN, mais tant que le coût est la considération principale, le service doit s'équiper de SSK, de types américain ou britannique éprouvés...». Advenant le choix d'un sous-marin diesel, la préférence allait à l'*Oberon* britannique en cas de primauté de l'aspect financier; le *Barbel* américain l'emportait en cas de primauté des exigences de la Marine et de l'industrie canadienne.

En 1961, l'achat de six sous-marins de la classe *Barbel* fut sérieusement considéré, puis un comité du cabinet de la Défense produisit un ensemble de décisions favorisant l'achat de trois *Oberon*. Après une période de confusion (un comité mis sur pied en 1962 insistait sur l'intérêt pour le Canada de s'équiper de SPN *Thresher*), des accords furent finalement conclus avec la Grande-Bretagne pour l'obtention de trois *Oberon*, acquisition beaucoup plus modeste que celle envisagée en 1959.

Le remplacement des trois *Oberon* étant prévu pour 1995, le MDN constitua une groupe de travail en juin 1983 pour étudier la possibilité d'acquérir quatre nouveaux sous-marins conventionnels. En août 1985, M. Eric Nielsen, alors ministre de la Défense, commanda une étude de faisabilité sur l'acquisition de sous-marins nucléaires. Des discussions entre des représentants des marines canadienne, anglaise et française s'ensuivirent en 1986, tandis qu'un consensus se dégageait au sein du cabinet en vue de trouver les ressources nécessaires à la construction de quatre SSK diesel-électriques*.

---

* Les sous-marins en compétition étaient : le *Upholder 2400* offert par *Vickers Shipbuilding and Engineering (VSEL)*, le *type 2000* et le *TR 1700* offerts respectivement par *Howalds werk Deutsche Werft (HDW)* et *Thyssen Nordseewerke (TNSW)*, le *Canwall (Canadian Walrus)* présenté par *RDM Naval Engeneering (RDM)*, le *CD 2000* présenté par *Pronav. France (PNF)*, le *A 17* offert par *Kockums Marine AB (KMAB)* et le *S-90* présenté par *Fincantieri*.

C'est alors qu'en juin 1987, le lancement d'un plan d'acquisition de dix à douze SPN fut annoncé dans le Livre blanc. La première étape qui consistait, pour un groupe de travail interministériel, à choisir le pays d'origine du SPN n'était pas achevée lorsque le projet fut annulé par le gouvernement Mulroney le 23 avril 1989, après de nombreuses déclarations d'appui dupremier ministre et de son ministre de la Défense, William McKnight.

3.2. À propos du débat sur les SPN

Le Livre blanc sur la défense proposait une politique globale de défense maritime. Définissant le pays comme une nation maritime, il concluait à la nécessité d'une politique assurant le maintien de la sécurité et de la souveraineté canadienne pour les trois océans qui bordent le pays. Cela exigeait un contrôle des approches océaniques et la capacité de répondre éventuellement à des incursions par la force.

Une flotte de dix à douze SPN avait été choisie pour remplir cette mission. Ce choix reposait (mise à part la question de la longueur exceptionnelle des côtes à patrouiller) sur la convergence de plusieurs facteurs favorables : maturité technologique suffisante de la propulsion nucléaire des SPN, existence, dans cette catégorie, de bâtiments encore coûteux mais dont le prix, par rapport à celui des sous-marins diesel-électriques avait beaucoup diminué; perspective d'une importance stratégique croissante des trois océans; caractère encore incertain des technologies relatives à la PIA.

Cependant, le lien logique entre la nécessité de la présence de la Marine dans les trois océans, les missions spécifiques qui lui seraient dévolues et le rôle unique qu'y joueraient les SPN, fut quelque peu laissé dans le vague jusqu'à l'annulation du projet. Par ailleurs, les analyses techniques des technologies relatives à la PIA, menées par le MDN à l'époque du PCAS, demandent une très sérieuse mise à jour.

3.2.1. Faut-il brûler le nucléaire?

Il n'est plus question maintenant de sous-marins à propulsion pleinement nucléaire pour la Marine canadienne. Cependant, le débat qui s'est développé autour de la nature nucléaire de la propulsion des sous-marins choisis par le Livre blanc sur la défense est révélateur des perceptions de bien des Canadiens et Canadiennes sur l'énergie nucléaire.

Lorsque M. Perrin Beatty, alors ministre de la Défense, introduisit la propulsion nucléaire dans son programme, il déclencha dans l'esprit de nombreux Canadiens et Canadiennes toute une gamme d'associations avec le *nucléaire*. Par rapport aux énergies conventionnelles, le *nucléaire* est la cible préférée* des critiques qui montent en épingle et confondent les dangers réels, probables, possibles et imaginaires. Le mot évoque d'abord la violente entrée en scène de cette forme d'énergie : on n'a jamais oublié 1945, ni les quinze années d'essais dans l'atmosphère qui ont suivi. Ce mot ranime un sur la pollution, les savants fous et l'apocalypse, mythes associés à la puissance nucléaire et à la radiation et que les médias entretiennent savamment**.

---

* Par exemple, l'accident de Three-Mile Island en 1979, étudié et publicisé en grands détails, accapara les journaux télévisés et imprimés durant toute une semaine, bien au-delà des États-Unis. Huit mois après, en Ontario, un wagon-citerne relâcha son contenu de chlore, provoquant l'évacuation en catastrophe d'un quart de millions de personnes; quelques colonnes parurent dans les journaux sur le sujet, rapidement remplacées par des commentaires sur la possibilité de nouveaux accidents de réacteurs. À peu près à la même époque, presque ignoré de la presse internationale, l'effondrement d'un barrage hydroélectrique aux Indes provoqua la mort de plus de mille personnes.

** Un rapide passage en revue des dix dernières années montre en 1979 «Le Syndrome chinois» où le réacteur et ses maîtres sont prêts à tuer à la moindre provocation. En 1980, «Hulk», un physicien frappé par des rayonnements nucléaires, devient une nouvelle version de «Dr. Jekyll et Mr. Hyde» à la télévision; au royaume des bandes dessinées, Superman et l'Homme-Araignée (qui fut mordu par une araignée radioactive) font équipe pour éliminer un travailleur de l'industrie nucléaire devenu dangereux après avoir manipulé un isotope radioactif, puis, sur leur lancée, détruisent un super-réacteur construit par un «méchant» qui voulait dominer le monde, etc., etc.

Il existe des questions afférentes aux dangers traditionnels propres au nucléaire, à savoir : i) le danger d'irradiation; ii) les risques d'accident; iii) la possibilité de prolifération. La propulsion nucléaire entraîne l'émission de radiations qui ne doivent pas atteindre les humains, de même que des risques d'accident qu'il s'agit de savoir prévenir et limiter, le cas échéant. En temps normal, le combustible radioactif et les produits de fission sont contenus dans leur gaine; le danger pour l'équipage est que les radiations traversent l'enveloppe du circuit primaire. Des écrans, installés autour de la cuve et du compartiment qui la contient, garantissent que les radiations atteignant l'équipage restent bien en-deçà des limites autorisées.

Les risques d'accidents associés à un réacteur nucléaire viennent de la quantité considérable de produits de fission contenue dans le coeur du réacteur et de la possibilité que ces derniers s'en échappent. Le réacteur commence en effet à fonctionner à un faible niveau de radioactivité, mais avec le temps, il accumule des produits de fission dans les barres de combustible. L'essence de la protection dans ce contexte, est de prévenir toute dispersion de cette radioactivité dans l'environnement.

3.2.2. Sécurité, performance et accidents

D'une manière générale, il n'y a pratiquement pas d'accidents connus dans les réacteurs de SPN américains, britanniques et français; quant à la technologie nucléaire canadienne, elle a donné à l'échelle mondiale d'excellents résultats.

Un recensement détaillé des accidents navals de 1945 à 1988 dressé en collaboration par *Greenpeace* et l'*Institute for Policy Studies*, dénombre une quantité significative d'accidents variés impliquant des sous-marins de toutes sortes et fait bien ressortir le caractère risqué qu'implique toute opération navale. Cependant, les accidents reliés directement aux réacteurs nucléaires fonctionnant à bord de SPN semblent extrêmement rares : pour sa part, la Marine américaine affirmait, au printemps 1989, que plus de 3 500 réacteurs-année d'opérations avaient eu lieu sans accident de réacteur. À

cela, le rapport *Greenpeace-Institute for Policy Studies* n'a pu opposer qu'un seul cas répertorié d'accident de réacteur de SPN (perte de liquide du circuit primaire) survenu au *USS Guardfish* (SSN-612) en 1973.

Par ailleurs, le haut niveau de succès de l'énergie nucléaire canadienne est attesté par des documents qui fournissent annuellement la liste des réacteurs les plus performants à travers le monde. Pour l'année se terminant le 31 décembre 1988, sept réacteurs CANDU se classaient parmi les vingt premiers en terme de performance durant l'exploitation; pour les gros réacteurs (plus de 500 MWe), six des dix meilleures performances viennent de réacteurs de type CANDU.

Tout ceci a pu autoriser un optimisme de bon aloi chez les promoteurs du PCAS quant à la fiabilité et la sécurité des réacteurs d'une flotte de SPN canadiens. Cependant, ces résultats sur les réacteurs de SPN et les filières CANDU sont, peut-être en partie le fruit de la chance, mais avant tout d'une longue tradition de rigueur dans le maintien de la qualité et de la sécurité. Bien que des estimations chiffrées donnent des probabilités négligeables d'accident grave, la complexité des phénomènes qui interviennent dans ces réacteurs et les nombreuses hypothèses qui sous-tendent ces résultats ne leur confèrent pas une valeur absolue. En fait, des facteurs difficiles à évaluer quantitativement (choix des matériaux, sérieux des contrôles, possibilités d'inspections détaillées quand le réacteur est en service et quand il est à l'arrêt, etc.) et la présence de techniciens chevronnés sont déterminants pour la sécurité (pour obtenir le permis d'opérateur de réacteur à l'Hydro-Ontario, un technicien doit étudier pendant huit ans et subir des examens établis par cette société et par la Commission de contrôle de l'énergie atomique [CCEA]). Dans le cas de l'acquisition d'une flotte de SPN, la marine canadienne devait s'attendre à créer une sorte de nouvelle «culture» nucléaire : déploiement d'énormes efforts pour former de jeunes officiers dans le domaine très exigeant de la technologie nucléaire, et l'apprentissage d'une collaboration avec des organismes civils concernant la sécurité. Le déplacement, le stockage du combustible sur le territoire et l'entreposage final des réacteurs de sous-marins déclassés sont reliés à l'environnement et donc nous concerne tous. Ces opérations allaient exiger une

collaboration étroite entre les secteurs militaire et civil. Aussi aurait-il été essentiel que des autorités civiles compétentes et indépendantes soient associées aux décisions sur la sécurité des SPN.

Par ailleurs, le PCAS aurait exigé des organisations nucléaires canadiennes une participation d'abord consultative puis de plus en plus élargie, suscitant à moyen et à long terme la création d'un nombre appréciable d'emplois dans la communauté nucléaire du Canada. Néanmoins, pour assurer un démarrage dans de bonnes contitions, le PCAS n'aurait eu d'autre choix que de faire appel à bon nombre de scientifiques et de techniciens déjà en poste dans les secteurs nucléaires traditionnels. Cette ponction se serait produite dans un personnel déjà affecté par des coupures budgétaires, à une période où il y a pénurie d'étudiant(e)s inscrit(e)s aux programmes universitaires de formation nucléaire et de cadres de formation supérieure.

Ainsi, le succès du PCAS, pour ce qui est de l'aspect nucléaire (sécurité et fiabilité) était effectivement possible étant donné la solide tradition nucléaire canadienne, moyennant toutefois un effort radical de la Marine canadienne et un renforcement du cadre institutionnel de l'industrie nucléaire. Ce dernier aspect aurait exigé du gouvernement fédéral, en parallèle avec sa décision d'acquérir des SPN, une prise de position claire sur le rôle et l'appui à donner à l'énergie nucléaire dans l'avenir.

Comme on l'a remarqué auparavant, le débat sur l'aspect nucléaire du PCAS a pris l'allure d'une guerre de chiffres entre des groupes (souvent opposés par principe à tout ce qui relève de la Défense et à tout ce qui est *nucléaire*) et des promoteurs donnant parfois l'impression que l'option nucléaire pour la Marine canadienne relevait seulement du domaine militaire, donc de la Défense. Selon ces derniers, l'expertise nécessaire disponible au Canada (technologie nucléaire, techniques de construction navale, etc.) était acquise d'avance et ne présentait pas de problèmes d'envergure. L'effort nécessaire, abondamment jaugé d'une façon strictement monétaire, n'a pas souvent été estimé en termes d'investissement humain, de l'établissement d'une tradition de qualité

spécifique à la propulsion marine nucléaire et du temps de maturation nécessaire pour y parvenir.

3.2.3. SPN et Traité de non-prolifération (TNP)

L'association «énergie nucléaire -- explosion nucléaire» dans le grand public se manifeste souvent par l'évocation d'un réacteur nucléaire pouvant exploser comme une bombe atomique. Dans les réacteurs à neutrons thermiques, une accélération accidentelle et non contrôlée de la réaction en chaîne détériore le combustible qui risque de fondre, ce qui n'a rien de commun avec une explosion nucléaire. Il y a cependant un lien plus subtil entre les aspects énergie -- civils et explosion -- militaires qui nous mène aux problèmes de «prolifération nucléaire».

L'uranium, combustible du réacteur, est constitué de deux isotopes principaux : l'U^{235}, responsable de la fission (et qui donne naissance aux produits de fission radioactifs) et l'U^{238}, non fissile, qui donne naissance à du plutonium 239. Les explosifs nucléaires sont constitués soit d'uranium enrichi en U^{235} à 93 p. 100 (la masse critique, c'est-à-dire suffisante pour faire une bombe, est le l'ordre de 25 kilogrammes), soit de Pu^{239} (masse critique d'environ 8 kilogrammes). Ainsi, les combustibles utilisés dans des réacteurs peuvent, en principe, être réutilisés (après traitement convenable) à des fins explosives.

C'est pourquoi il existe un régime international de non-prolifération nucléaire, dont le Traité de non-prolifération (TNP) est la pierre angulaire. L'Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA), basée à Vienne, a pour rôle de vérifier que les différents États n'utilisent pas de matériaux nucléaires à des fins militaires explosives. Certaines utilisations militaires non explosives, telle que la propulsion navale furent autorisées, à condition que l'IAEA soit capable de suivre avec précision la nature et la quantité de matériel soustrait au contrôle de l'Agence. La crainte de certains experts en non-prolifération fut que l'IAEA, à cause des exigences de secret dues à la nature militaire des activités des SPN, ne soit pas capable de s'assurer que de la matière fissile n'ait pas

été détournée pour la production d'explosifs nucléaires. Cette inquiétude, au demeurant fort légitime, étant donné l'importance du problème de la prolifération nucléaire , a donné lieu à plusieurs rapports se concentrant surtout sur l'aspect politique et légal du problème. La nature technologique du problème a été pratiquement ignorée.

Deux méthodes de détournement sont possibles : 1) subtiliser du combustible avant chargement dans un réacteur et l'enrichir en U^{235} jusqu'au niveau approprié pour fabriquer une bombe; 2) extraire du Pu^{239} du combustible irradié durant le fonctionnement du réacteur, pour le retraiter à des fins explosives. Un coeur riche en U^{235} (combustibles de SPN américains et britanniques) se prête à la première possibilité. Un coeur plus pauvre en U^{235}, et donc plus riche en U^{238} (réacteurs commerciaux, réacteurs de recherche, réacteurs de SPN français, réacteurs d'hybride nucléaire) se prête à la deuxième possibilité.

Il est exact que des développements d'ordre économique et technique accroissent le danger de prolifération nucléaire par le plutonium, que des nouveaux procédés rendent plus simple l'acquisition d'uranium enrichi et que les progrès de l'informatique permettent de mettre au point des bombes à fission sans passer par des explosions expérimentales. Cependant, la récupération du combustible épuisé d'un réacteur de sous-marin, dans le but de fabriquer un explosif, serait sujet à des obstacles de taille : i) le plutonium présent dans le combustible épuisé se trouve au milieu de produits de fission hautement radioactifs -- à l'intérieur de gaines ou de capsules -- desquels il ne peut être séparé que dans le cadre d'une installation de retraitement impliquant des opérations chimiques menées à distance dans des enceintes isolées; ii) contrairement à l'uranium, le plutonium 239, qu'il soit à l'état pur ou mélangé à d'autres isotopes, est radioactif et sa manipulation exige des précautions sophistiquées. La fabrication d'explosifs suivant cette voie n'est théoriquement pas impossible, mais très invraisemblable en pratique, d'autant plus que les réacteurs à eau sous pression des SPN ne sont pas indiqués pour produire du plutonium 239 en quantité et de haute pureté isotopique; les réacteurs utilisés en général pour la production de cet élément (de manière illicite ou non) sont d'un autre type (réacteurs modérés à l'eau lourde, comme le CANDU, par exemple, ou à uranium

naturel modérés au graphite). Ceci permet de conclure que l'utilisation du combustible à faible enrichissement d'uranium (moins de 20 p. 100) d' un réacteur à propulsion navale constitue une source de prolifération beaucoup moins conséquente que l'utilisation du combustible traditionnel à uranium très enrichi (plus de 90 p. 100).

C'est ainsi que le danger de prolifération relié aux quantités de plutonium fabriquées par le réacteur de l'*Améthyste* (10 MWe), parfois évoqué par certains groupes, a paru très académique dans les milieux plus familiers avec la technologie nucléaire (d'autant plus que la composition du combustible de type «Caramel» utilisé dans l'*Améthyste* se prête très mal à un retraitement). La difficulté de détourner du plutonium s'appliquerait encore davantage à des réacteurs d'hybrides nucléaires eux aussi à faible enrichissement en U^{235} et encore moins puissants (500 à 2 000 Kwe).

3.2.4. Incidence sur l'industrie

Il est certain que l'acquisition de dix à douze SPN ou de tout autre ensemble de sous-marins aurait une incidence importante sur l'économie canadienne. Il est toutefois risqué de faire des prédictions sur les répercussions que cela pourrait entraîner.

L'ambiguïté de la relation entre la production de défense et les bénéfices économiques pour la communauté dans son ensemble est reflétée par l'abondance d'opinions publiées sur le sujet. Jusqu'ici, l'option du Canada pour le soutien économique de la défense a été de se procurer les systèmes d'armements de taille importante (sous-marins *Oberon*, chasseurs F-18, etc.) par achat direct et de spécialiser sa production de défense à une liste étroite de petits systèmes, composantes prévues surtout pour l'exploitation, ce qui rend le pays évidemment très dépendant, en particulier des États-Unis. Pour le PCAS, le gouvernement canadien avait choisi la production sous licence. Cette approche, qui revient à une cession de savoir-faire par le pays fournisseur, laisse espérer en général une limitation des budgets d'acquisition et un accroissement de la capacité industrielle du pays par la même occasion. Par ailleurs, du fait de leur ampleur, de leur durée et de leur label de haute technologie, des programmes de cette

nature lient le gouvernement au secteur de production à technologie de pointe, lui permettant d'agir directement sur la performance économique des provinces, l'emploi et la nature des domaines qu'il entend développer en dehors de tout critère spécifiquement militaire.

De ce point de vue, les responsables du PCAS prévoyaient que ce projet représenterait plus de 50 000 années-personnes de travail. Certains des procédés industriels introduits par ce programme étaient sujets à une certaine familiarité de la part des industries canadiennes, comme les cuves, pompes et échangeurs de chaleur afférent aux réacteurs, de même que les turbo-générateurs, batteries, moteurs diesel, etc. L'industrie canadienne était déjà active dans les systèmes et composants électroniques. Par ailleurs, l'industrie maritime canadienne n'ayant jamais construit de sous-marin moderne, encore moins nucléaire, les activités dans les chantiers navals où les SPN auraient été assemblés (et qui représentent un pourcentage important d'emplois) auraient eu à subir des changements de méthodes considérables dans la préparation des matériaux, la fabrication des cloisons et le montage de ces éléments sur les tronçons de la coque.

En tout état de cause, si le projet avait été poursuivi, l'accaparement des moyens de production par le secteur de défense, que lui reprochent habituellement ses détracteurs, n'aurait certainement pas joué dans le cas des chantiers navals nettement à court de commandes. Dans la mesure où les chantiers navals auraient été capables de soutenir le choc de ces changements, les nouvelles techniques entraînant des exigences accrues de qualité et de sophistication auraient, à la longue, amélioré leur efficacité et leur compétitivité.

4. ET MAINTENANT, QUELLES OPTIONS ?

4.1. État de la question

L'annulation du PCAS complique l'évaluation technologique de la dimension sous-marine de la stratégie maritime canadienne déjà délicate. On le sait déjà : une marine moderne entraîne des coûts élevés, des techniques complexes et une prévision à court et à long termes. En effet, tout bâtiment contient des composantes de durée de vie utile longue (la coque et le système de propulsion d'un bâtiment durent une trentaine d'année) et courte (les systèmes de combat changent parfois d'un carénage à l'autre). Aussi, la composition de la flotte canadienne des années 2020 dépendra t-elle des décisions prises (ou non prises) dans les mois à venir. Cet état de chose nécessite une planification à long terme, donc risquée : on ne peut guère prévoir avec certitude les technologies qui seront dominantes au siècle prochain en matière de lutte ASM (détection non acoustisque des sous-marins, propulsion magnétohydrodynamique etc.); les différentes alliances et rivalités dans lesquelles devra naviguer le Canada (OTAN ou alliance des pays bordant l'océan Arctique) durant le siècle prochain sont bien difficiles à prévoir.

Qui plus est, l'annulation récente du PCAS rend les relations entre la technologie et la politique beaucoup plus difficiles à saisir. Le montant de la facture a fait reculer le gouvernement. Cependant, jusqu'à nouvel ordre, la mission définie par le Livre blanc reste, pour ce même gouvernement, la politique officielle canadienne en matière de défense maritime. On est donc amené, tout au moins dans une première phase, à se demander comment remplir cette même mission à l'aide de SSK conventionnels et moins coûteux; ensuite, en se basant sur l'articulation de cette mission avec la technologie sous-marine, on peut essayer de voir comment la marine canadienne peut se passer de SPN en minimisant certaines tâches que ne peut exécuter un SSK et même tirer profit de l'évolution probable des technologies sous-marines dans les prochaines décades. Après quoi, un scénario possible du développement de la flotte sous-marine canadienne sera évoqué.

4.2. Sous-marins conventionnels

L'absence de SPN dans la flotte canadienne à venir place la Marine canadienne devant l'option de remplacer un ensemble de bâtiments rapides, manoeuvrables, autonomes et de grande taille par un ensemble de sous-marins conventionnels dont chaque unité coûte moins cher et qui ne pourrait compenser son manque de manoeuvrabilité que par un nombre plus élevé d'unités. En d'autres mots, un petit nombre de bâtiments de manoeuvre serait remplacé par un nombre plus grand de bâtiments de position : ainsi on remplacerait la qualité par la quantité. Des navires plus petits ont évidemment moins d'espace pour un système de combat, mais, en nombre plus grand, ils pourraient garder leur utilité (malgré une réserve de projectiles réduite) parce que plus nombreux. Cependant, s'il y a véritablement un programme de sous-marins canadiens en remplacement du PCAS (dix à douze SPN), ce programme, qui ne comptera probablement pas plus de six ou huit unités, ne remplacera pas la qualité par le nombre, mais diminuera les deux à la fois pour réduire les coûts.

Par ailleurs, l'évolution des missions assignées aux sous-marins canadiens dans l'avenir et l'évolution des technologies pourraient favoriser des bateaux plus petits et plus spécialisés. i) L'avenir limitera peut-être le rôle d'une flotte de sous-marins à un rôle exclusif de surveillance en temps de paix et d'apport à la lutte ASM en temps de guerre. Alors, l'importance du système d'armements du sous-marin deviendrait limitée par rapport aux capacités de détection, ce qui aurait un effet sur sa structure. De plus, les rôles assignés au sous-marin tels la pose de mines, les opérations de commando et la lutte anti-navires de surface dans des eaux éloignées pourraient devenir secondaires et, par conséquent, ne pas augmenter le prix des unités. ii) La tendance à limiter les techniques de détection passive, évoquée auparavant, donnera un avantage à des navires plus petits : bien que des progrès technologiques dans la détection passive (ordinateurs neuroniques, mini sous-marins autonomes, etc.) soient à prévoir, la prépondérance à venir de la détection active rend les gros bateaux plus repérables (l'écho de retour semble être de plus en plus difficile à réduire par des plaques anéchoïques placées sur la coque).

Autre articulation importante mission-technologie : étant donné les trois océans qui bordent le Canada, toute volonté du gouvernement d'assurer un certain contrôle de l'Arctique canadien par des sous-marins exige la mise en oeuvre chez ces derniers d'une propulsion indépendante de l'air : une telle technologie est essentielle dans le cas de l'Arctique et est extrêmement souhaitable dans l'Atlantique et le Pacifique. S'il est vrai que la situation actuelle des différentes technologies est encore incertaine, la prochaine décade verra un passage du diesel-électrique traditionnel à d'autres formes hybrides, (passées en revue dans la section 2.3.3.).

Finalement, étant donné la conjoncture internationale tendant à limiter les efforts de défense, il sera encore plus important qu'auparavant pour le MDN : i) de convaincre l'industrie privée et les Affaires extérieures que l'acquisition de sous-marins par le Canada sera bénéfique pour l'infrastructure industrielle canadienne; ii) d'obtenir l'approbation d'une partie importante de la population canadienne, après un débat éclairé sur la stratégie maritime du pays.

4.3. Scénario pour sous-marins canadiens

Dans le mélange complexe de contraintes à court et long terme et les incertitudes inhérentes à tout projet d'envergure, un scénario de Recherche et Développement concernant les sous-marins canadiens pourrait être le suivant :

Phase I. Sous-marins conventionnels. L'acquisition de tels sous-marins devient urgente, en raison de la mise à la retraite prochaine des trois *Oberon* canadiens. A partir de 1995, ces bâtiments devront être progressivement «détimbrés» : la profondeur maximale qu'ils peuvent se permettre devra être diminuée pour assurer la sécurité du navire. La Marine britannique a retiré du service ses vieux *Oberon* et le Canada en a acheté un pour le transformer en «école à quai», à Halifax (il ne navigue plus). En dehors de cette préoccupation à court terme, la flotte de sous-marins conventionnels, de

six à huit unités, devrait être considérée comme une base de départ pour le siècle prochain.

Les pays candidats susceptibles de fournir des sous-marins passeraient très probablement de deux (comme c'était le cas pour les SPN) à six (comme cela fut le cas lors de la première version du PCAS). Malgré le manque de données précises sur les types de bâtiments qui pourraient être en compétition, il est opportun d'avancer ce qui suit : i) Les types de bâtiments ne seront pas nécessairement identiques à ceux proposés en 1986; ainsi, *KMAB* mettra en lice le *471* qui a fait l'objet d'un contrat d'acquisition avec l'Australie; au lieu du *CD 2000*, la France proposera probablement un sous-marin très semblable à une version «dénucléarisée» de l'*Améthyste*. *RDM* pourrait proposer les plans du *Moray 1800* conçu de manière à accueillir un système PIA auxiliaire. Une version du *U212*, qui doit résulter de la collaboration entre plusieurs compagnies allemandes, sera proposée au Canada, ainsi que le dernier projet du *VSEL*, le *type 2497*, représentant l'état de la famille de sous-marins *2400*, une fois doté des technologies disponibles en 1997. ii) La France et la Grande-Bretagne pourraient avoir un avantage sur les autres concurrents de par l'interaction intense des deux dernières années dans le cadre de leur compétition «nucléaire», pour l'obtention du contrat canadien et de par leur statut de puissances dotées d'une force de dissuasion nucléaire sous-marine, ce qui nécessite de leur part un effort prioritaire et national dans les technologies sous-marines.

Phase II. La prochaine décennie verra la généralisation de plusieurs types de PIA. Il est encore difficile de distinguer laquelle ou lesquelles de ces options vont être adoptées. Tous les projets de recherche et développement de PIA sont présentement sujets aux risques inhérents aux projets de longue haleine et les différentes amirautés sont réticentes devant toute nouvelle technologie sous-marine qui n'a pas encore subi d'essais opérationnels en mer. Devant ce mélange d'incertitudes et de promesses, une planification à moyen terme s'impose et, après des évaluations technologiques sur une base assez large, un type de PIA pourrait être adopté dans les sous-marins canadiens d'ici cinq ans.

Chacune de ces technologies jouit du soutien d'ardents défenseurs. En fait, *RDM* est la seule, parmi les compagnies produisant des sous-marins, à avoir entrepris une étude comparative de plusieurs types de PIA. Le choix du 471 de *Kockum* constituerait un atout pour la technologie basée sur le moteur Stirling si l'Australie, qui a choisi ce sous-marin, adopte cette technologie comme propulsion auxiliaire; le choix d'un sous-marin allemand pourrait favoriser l'adoption de piles à combustible à membrane que la Marine allemande envisage d'incorporer à sa prochaine génération de sous-marins. L'augmentation d'autonomie permise par ces deux technologies a fait passer de deux jours à deux semaines les séjours en immersion, selon les rapports des fabriquants. Cependant, cette amélioration concerne des sous-marins de petit tonnage (entre 1000 et 1500 tonnes) capables de vitesses en immersion modestes; les sous-marins qui seraient considérés par le Canada sont de l'ordre de 2500 à 3000 tonnes et à plus grande autonomie étant donné les distances canadiennes, ce qui nécessiterait une augmentation en puissance et en énergie des systèmes auxiliaires actuellement à l'essai.

Dans la classe des diesels à cycle fermé, les vaisseaux étudiés par les firmes italiennes *Fincantieri-Maritalia*, pour l'instant de petite taille, sont dotés comme on l'a vu d'un volume intérieur relativement plus grand, d'une coque relativement solide et bon marché amortissant les bruits du vaisseau. Ces caractéristiques les rendent plus aptes à survivre dans un milieu de détection par sonars actifs. Si le concept reste valable pour des bateaux de plus grande taille, ces bateaux atteindraient une autonomie en pratique presque équivalente à celle des SPN. Cependant, certaines projections sur l'amélioration des performances du bâtiment laissent perplexe. Ainsi, la possibilité prêtée à des sous-marins de ce type de naviguer, complètement submergés, à une vitesse de trente noeuds, durant trois mille milles, suggère l'existence de moteurs diesel fonctionnant en cycle fermé à une puissance d'une dizaine de MW. Pour se faire une idée plus précise du potentiel de ces systèmes, une évaluation technologique détaillée sur la structure, la propulsion et la sécurité de ces bateaux s'impose. Dans plusieurs pays, où se développent actuellement ces technologies, des efforts sont actuellement entrepris en vue d' atteindre des niveaux de performance plus élevés. *RDM*, comme on l'a vu, étudie un moteur diesel à cycle fermé de 500 Kw; *Kockums*, en collaboration avec la compagnie

allemande *MAN*, travaille à la mise au point d'un moteur Stirling de 600 kw; le *Mechanical Technology Institute (MTI)* déclare être capable de présenter un moteur Stirling (quatre cylindres) de 1 MW appliqué à la propulsion navale; dans le domaine des piles à combustible à membrane, *Ballard Technology* s'est associée à *VSEL* et *Siemens* et est responsable de la propulsion auxiliaire du prochain sous-marin allemand (Type *212*). Il semble qu'à moyen terme (d'ici cinq ans) les moteurs Stirling soient les plus prometteurs, alors que le potentiel des piles à combustible se vérifiera à plus long terme pour les sous-marins de grande taille. Somme toute, les systèmes de propulsion hybrides non nucléaires opérationels vers la fin des années 1990, seront vraisemblablement dotés d'une puissance adéquate pour des manoeuvres en mers restreintes telles que la Baltique, mais un peu juste (600 kw) pour des bâtiments océaniques.*

La technologie hybride nucléaire pourrait devenir le choix canadien, i) du fait des conditions géographiques du pays : les grandes distances encourues par le littoral et l'existence de l'Arctique; ii) du fait des activités canadiennes (et en particulier du travail des techniciens de la compagnie *ECS*) dans le domaine des petits réacteurs. La simplicité des mini-réacteurs diminue, en principe, les exigences de contrôle de qualité, d'opération et d'entretien des réacteurs à eau pressurisée de SPN. Le développement et l'utilisation d'un système de propulsion basé sur un réacteur plus simple que les réacteurs traditionnels (plus puissants et plus complexes) exigeraient un effort d'adaptation moins massif et moins radical de la part de la communauté nucléaire et de la Marine canadienne.

---

* Rappelons que la puissance fournie par le moteur auxiliaire n'est pas complètement utilisée pour la propulsion du sous-marin : une fraction (environ 150 kw) est consacrée au fonctionnement des systèmes de sonars, d'armement et de régénération de l'air du bâtiment.

Cependant, la recherche et le développement d'un réacteur de type AMPS, proposés par *ECS* (voir section 2.3.3) doit : i) passer le cap des essais au sol dans un environnement qui reproduit les conditions d'un sous-marin en mer (ce qui nécessite une mise de fonds considérable ou l'appui d'un organisme extérieur); ii) montrer notamment, dans le cadre de ces essais, que le passage des prototypes de 100 KWe (adéquats pour des petits sous-marins) à des puissances plus hautes (disons 1.5 Mwe), et militairement plus crédibles pour de plus grands sous-marins, peut se réaliser en sauvegardant leur simplicité et les avantages qui s'y rattachent. (Suivrait alors l'installation d'un prototype dans une coque de sous-marin et l'épreuve d'essais en mer avant une adoption définitive). Une autre option, ébauchée à l'automne 1989 dans une étude préliminaire sur le concept de petits réacteurs développé par *Technicatome* (évoquée dans la section 2.3.3.), découlerait d'une démarche inverse de celle d'*ECS* : entreprendre le développement d'un réacteur d'environ 1.5 Mwe à partir de la technologie du réacteur de 10 Mwe (en service sur l'*Améthyste*) dans l'espoir d'en augmenter suffisamment la simplicité pour en faire un système intéressant à exploiter. Les étapes de cette option -- le développement du réacteur, les essais au sol, les essais en mer, seraient facilitées du fait de la base technologique très large du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) français. Un accord dans le sens d'une collaboration entre les institutions canadiennes et françaises pour le développement d'un tel réacteur et sa mise en service nécessiterait évidemment un investissement de la partie canadienne et l'aboutissement d'une telle collaboration serait évidemment sujet aux incertitudes (politiques, financières, etc.) inhérentes à ce genre de projet.

Tout projet d'acquisition de sous-marins s'inscrit dans le contexte d'une stratégie maritime canadienne plus vaste. Celle-ci doit tenir compte de la longueur du littoral canadien (71 000 kilomètres sans compter les îles), le plus long mais aussi le plus difficile qui soit à cause de la façade arctique du Nord. Un des rôles du MDN est de présenter des propositions sur la création d'une flotte dont le potentiel et la composition lui permettront d'atteindre des objectifs précis découlant de cette stratégie. Ces considérations d'ordre stratégique mises à part, la limitation des ressources financières,

économiques et technologiques du pays restreignent la réalisation de programmes par ailleurs souhaitables. Le compromis final, portant sur la remise en condition de la Marine canadienne, sera une décision politique : la facture élevée de cette remise en condition -- avec ou sans SPN -- met ce projet, du fait même de son ampleur, en concurrence avec d'autres priorités nationales, économiques, stratégiques et politiques (environnement, réduction du déficit, etc.). Renoncer à cette tâche permettra certainement une économie voyante à court terme mais comporte en même temps le risque, moins évident, et difficile à évaluer, de glisser à long terme vers un protectorat américain. La décision sera d'autant meilleure qu'elle aura été prise au terme d'un débat nourri par une bonne information politique, technologique, économique. C'est à l'aspect technologique que le présent travail s'est plus spécifiquement attaché.

ANNEXE -- TRAFALGAR ET AMÉTHYSTE

La comparaison détaillée des SPN français et britannique était délicate, le compromis entre la préservation du secret et la promotion du sous-marin proposé causant parfois de la confusion. Ainsi, la vitesse maximale des deux candidats, soit environ vingt-sept et trente-deux noeuds pour l'*Améthyste* et le *Trafalgar* respectivement, fut souvent mentionnée. La vitesse acoustique, beaucoup plus importante, ne le fut jamais. (C'est à cette vitesse que le système de sonars passifs du SPN n'est pas entravé dans son fonctionnement par les bruits émis par le bâtiment lui-même). Mais surtout, ces deux bâtiments, très différents quant au déplacement et au diamètre de la coque (5 200 tonnes -- 9,8m pour le *Trafalgar*, 2 600 tonnes -- 7,6m pour l'*Améthyste*) étaient le résultat de philosophies technologiques très différentes.

Le réacteur du *Trafalgar* présentait l'avantage d'une conception éprouvée (et peut-être même vieillissante), car il a été monté dans de très nombreux sous-marins ayant opéré un peu partout dans le monde. Son combustible nucléaire à base d'uranium hautement enrichi a vraisemblablement une durée de vie de douze à quinze ans, dans les conditions d'exploitation du bâtiment. La vapeur engendrée par le réacteur actionne une turbine amenée à tourner plus lentement par l'intermédiaire d'un réducteur analogue au dérailleur d'une bicyclette de montagne. Le système turbo-mécanique est lourd, bruyant, mais efficace. Les sources sonores du système de propulsion ont été progressivement réduites dans le processus d'évolution dont le *Trafalgar* est le fruit. Le réacteur est monté sur un bâtis, dosage délicat d'élasticité, de rigidité et de résistance aux chocs; ce bâtis, qui a le double rôle de soutenir le réacteur et d'empêcher les sons qu'il émet d'atteindre la coque, a été constamment raffiné. Les contrats obtenus par le fabricant auprès de la Marine américaine témoignent de la haute qualité de la technologie ainsi mise au point.

Dans le réacteur de l'*Améthyste*, la position du générateur de vapeur, fixé directement sur la cuve, rend inutiles les boucles extérieures de tuyauterie qu'on trouve dans les réacteurs traditionnels; il assure la circulation de l'eau entre le coeur du réacteur et les échangeurs de chaleur par convection naturelle plutôt que par des pompes, ce qui réduit considérablement les sources de bruit communes aux réacteurs plus classiques. L'enrichissement de l'uranium utilisé est inférieur à 10 p. 100 et a une durée de vie de dix ans dans les conditions d'exploitation du bâtiment. La vapeur sortant du réacteur actionne des turbines qui entraînent deux alternateurs dont le courant électrique fait fonctionner un moteur qui, à son tour, fait tourner l'hélice. Un tel système est plus souple et intrinsèquement plus silencieux que les systèmes turbo-mécaniques nécessaires aux sous-marins de plus de 4 000 tonnes. Le premir bâtiment de la classe *Rubis*, destiné à l'attaque de navires de surface plutôt qu'à la lutte anti sous-marine, devint dans la version *Améthyste* plus manoeuvrable et silencieux, grâce à un nouveau profilage de la coque et à l'installation de matériaux amortisseurs de sons dans sa structure.

Le *Trafalgar* et l'*Améthytste* peuvent descendre jusqu'à plus de 300 mètres et 350 mètres, respectivement. Comme le Canada voulait équiper ses sous-marins de torpilles MK-48, la Marine française allongea de six mètres la partie avant de la coque. Les systèmes de combat sont en quelque sorte moins caractéristiques des deux SPN rivaux, à cause du rythme de leur remplacement. Le *Trafalgar*, plus vaste, est plus à même de recevoir des appareillages encombrants, tandis que l'automatisation des systèmes de combat revêt plus d'importance à bord de l'*Améthyste*.

Le prix de chaque SPN revenait environ à 450 millions de dollars pour le *Trafalgar* et à 350 millions pour l'*Améthyste* (version modifiée afin de respecter les normes canadiennes). Le MDN n'indiqua pas officiellement ce qu'il en aurait coûté pour assurer l'entretien du navire (fourniture de combustible et travaux de carénage) pendant une vingtaine d'années; or, il convient de ne pas oublier cet aspect dans les considérations financières à long terme. L'équipage du *Trafalgar* compte 115 membres, dont une centaine à bord, tandis que l'*Améthyste* a deux équipages de soixante-six membres. Le

bâtiment français a une vie utile de trente ans à raison de 280 jours par an pendant les cycles opérationnels entre des carénages d'un an tous les cinq à sept ans, ce qui se compare favorablement aux données relatives au *Trafalgar* : vingt-cinq ans, à raison de 235 jours par an pendant les cycles opérationnels entre des carénages de deux ans tous les six ans. Le taux d'utilisation nettement plus élevé pour l'*Améthyste* que pour le *Trafalgar* (ce qui explique la durée de vie apparemment plus grande du combustible à bord du *Trafalgar*), tient probablement à la taille plus petite du bâtiment français, à l'utilisation d'un acier de qualité supérieure et à l'installation de quatre brèches sur la coque, facilitant le retrait de l'équipement et des machines, lors des carénages. Une estimation du Centre canadien du contrôle des armements et du désarmement (CCCAD), basée en partie sur des recherches du *Congress Research Centre (CRS)* à Washington, indiquait que l'entretien de l'*Améthyste* est moins coûteux que celui du *Trafalgar* ; l'entretien de ce dernier ne revenait pas plus cher, selon le MDN, que celui du destroyer DDH-280 actuellement en service au Canada.

Tout transfert de technologie ou de combustible au Canada, qui concerne le réacteur nucléaire d'origine américaine est assujetti à l'accord américano-canadien de 1959. Ainsi, si le Canada avait opté pour le *Trafalgar*, le Congrès américain aurait eu à voter pour modifier cet accord, ce qui n'aurait pas été sans conséquences pour l'image de la souveraineté canadienne. De plus, si l'on en croit des articles de journaux dont le contenu ne fut pas démenti par le MDN, le Canada n'aurait pas pu obtenir d'informations sur la technologie du réacteur une fois écoulée la période au cours de laquelle se serait effectué le transfert; de plus la livraison de combustible aurait été assujettie à des contrats renouvelables de cinq ans. Par contre, la technologie de l'*Améthyste* présente l'avantage considérable d'être totalement régie par le pays d'origine de ce SPN.

BIBLIOGRAPHIE

LE DÉBAT CANADIEN

«Défi et engagement. Une politique de défense pour le Canada». Perrin Beatty. Juin 1987.

«Le projet canadien d'acquisition de sous-marins» (PCAS). Fascicule nº 41. Comité permanent de la Défense. Chambre des communes. 1988.

Fascicules nºs 24- 25- 26- 28- 29- 38 et 39. Comité permanent de la Défense. Chambre des communes.

«Communiqués sur le contrôle des armements» nºs 36- 37- 41- 45- 48 et 50.

«Alternative Defence spending program». Steve Lee, CIIPS Report, 1988.

LE CONTEXTE TECHNOLOGIQUE

Du submersible au sous-marin

The U-boat, the evolution and technical history of German Submarines. Eberhard Rössler. Naval Institute Press. 1984.

Nuclear Navy 1942-1962. Richard G. Hewlett and Francis Duncan. The University of Chicago Press. 1974.

Le sous-marin dans l'océan

Strategic Antisubmarine Warfare and Naval Strategy. Tom Stefanick, Lexington books, 1987.

Arsenal. Understanding Weapons in the nuclear age. Kosta Tsipis. Simon and Schuster, New York 1983.

Propulsion

Le SPN à toute vapeur

«The Nuclear-Powered Submarine», R. O'Rourke. Naval Forces, vol VII, nº 1, 1986.

Submarine design and development. Norman Friedman. Naval Institute Press, 1984.

Sous-marins diesel-électriques

«Developments in Conventional Submarine design». F. Abels. Naval Forces nº VI/1982, p. 61.

«Nuclear and Conventional Submarines». Naval Forces nº 1/1984, vol V, p. 60.

Hybrides

«Staying under longer: the SSK closes the gap». David Faxwell. Naval Forces III/1989, vol X p. 54.

«In search of air-independence». CA Prins et AA Ham. Maritime Defence. March 1988, p. 75.

«Non Nuclear Air Independent Propulsion (NNAIP) in Submarines». B. Goulard, in Proceedings Nuclear Powered Submarines in non-nuclear weapons states. MIT workshop. March 27-28 1989.

«Europeans Study technologies to quiet Conventional Subs» Staff. Defence News, September 11, 1989.

«Propulsion Engines for small submarines: A Canadian prospective». A. Kendwick, preprint presented at the 11th Mari-Tech technical Conference
June 7 - 9, 1989.

«Cosworth Deep Sea Systems -- and a new underwater power source» R. Corlett, Maritime Defence, p. 297, september 1989.

«The incredible shrinking submarine». Richard Compton-Hall. New Scientist. 1 April 1989.

««20 gst 48» A snorkeless wakeless diesel submarines of a new generation» by A. Tufano and G. Santi, international Symposium on Conventional naval Submarines. 3 - 5 May 1988, London.

«Written brief on the subject of the CASAP». William M. Kumm 1988.

«Next generation non-nuclear Submarines. Stirling cycle or fuel cell?». Maritime Defence, p. 69. March 1988.

«A closed cycle diesel propulsion system for Submarines» by D. Wittekind and B. Wübbels. International symposium on Conventional naval Submarines 3 - 5 May London 1988.

«The SSN: An affordable platform for enhancing undersea naval capability» A.F. Oliva and R. J. Gosling preprint presented at USD 1988. San Diego, October 1988.

«The nuclear coastal submarine: an alternative to exotic propulsion systems» by G. Boisrayon. International Symposium on conventional naval submarines 3 - 5 May. London 1988.

L'évolution des technologies

«A quiet Revolution». R. Chatham, Proceedings, January 84.

Modern Submarine Warfare. David Miller and John Jordan. Military Press, New York 1987.

«Report of the advisory panel on submarine and antisubmarine warfare to the House Armed Service subcommittee on Research and Development and Seapower and Strategic and critical materials», March 21, 1989.

L'ACQUISITION DE SOUS-MARINS PAR LE CANADA

«Canada and submarine warfare 1909-1950», R. Sarty, Conference on undersea dimension of Maritime Strategy, Halifax 21-26 juin 1989.

«The development of Antisubmarine warfare to 1945 - 3 surface ships and aircraft». George Lindsey. Conference on the Undersea dimension on Maritime Strategy, Halifax, 21 juin 1989.

Les méandres de la décision canadienne

«Submarine Acquisition in the RCN: From Nuclear to Conventional, 1955-65», by S.M. Davis; Center for International Relations occasional paper nº 25, January 1988.

«CASAP Update: Program makes definite progress amid rising controversy» in Canada's Navy Annual, Wings Magazine 1987/88, p. 87.

À PROPOS DU DÉBAT SUR LES SPN

Faut-il brûler le nucléaire ?

Nuclear Fear. Spencer Weart, Harvard University Press. 1988.

«Coup d'oeil sur le nucléaire. Sommaire des données sur l'utilité, l'énergie, la recherche et le développement, EACL.»

Sécurité, performance et accidents

Le dossier électronucléaire. Syndicat CFDT de l'énergie atomique. Editions du Seuil, 1980.

«Démystification de l'énergie nucléaire». Dixième rapport du Comité permanent de l'Énergie, des Mines et des Ressources. Chambre des communes. Fascicule nº 48.

«Naval Accidents 1965-1988» by W.M. Arkin and J. Mandler. Neptune Papers nº 3. June 1989.

SPN et Traité de non-prolifération (TNP)

«Canada's Nuclear Submarine Program: A new Proliferation Concern». Tariq Rauf and Marie-France Desjardins. Arms Control Today, p. 13, December 1988.

«Stemming the spread of Nuclear Weapons». Marvin Miller. Technology Review, p. 66. January/February 1987.

«Opening Pandora's Box? Nuclear-Powered Submarines and the Spread of Nuclear Weapons». Marie-France Desjardins et Tariq Rauf, Aurora Papers nº 8. The CCACD. June 1988.

Incidence sur l'industrie

«The weapons acquisition process: Alternative national Strategies». R. Head, p. 412 in Comparative Defence Policy edited by F. Morton, A. Rogerson, E. Warner. The John Hopkins University Press.

«The Economic Significance of the Canadian Defence Industrial Base» by John Treddenick p. 15 in Canada's Defence Industrial Base edited by David G. Haglund. 1988, Ronald Frye and Company.

«Les périls de l'intégration de la défense». Roger Hill, Paix et Sécurité, Été 1989, nº 2, p. 4.

ET MAINTENANT, QUELLES OPTIONS ?

«The Nonacoustic Detection of Submarines». Tom Stefanick. Scientific American, 258, 41, 1988.

«Défi et engagement. Une politique de défense pour le Canada.» Perrin Beatty. Juin 1987.

«Rapport au Comité sur la Défense nationale du Comité sénatorial permanent des Affaires extérieures». Mai 1983.

«Aviation Week and Space Technology». September 21, 1987.

Navy News and Underwater Technology, 6, July 1, 1989; 7, January 22, 1990; 7, January 29, 1990; 7, April 2, 1990; 7, April 23, 1990.

«Aim, design, construction and testing of the autonomous Stirling liquid oxygen power plant for Swedish submarines», Göran Johanson et Herbert Nilson, International Conference on Submarine Systems, 8-10 mai 1990, Stockholm.

«The type 471 SSK future cutting edge of the RAN», Rupert Pegelley, International Defence Review, 5/1988, p. 523.

«Special: the U212», Cdt Raimund Wallner, Proceedings, March 1990, p. 88.

«Submarines made in Germany -- Designs, Markets and Trends», Hans Saeger, Eckhard Gruhl et Jürgen Ritterhoff, International Conference on Submarine Systems, 8-10 mai 1990, Stockholm.

«Fuel cell powered submarines», William Kumm, International Conference on Submarine Systems, 8-10 mai 1990, Stockholm.

«Atmosphere independent propulsion for diesel electric ocean going submarines», C.A. Prins, Maritime Defence, novembre 1989, p. 359.

«Project definition study for the Moray 1800», Ron Tessalaer, Maritime Defence 15, avril 1990, p. 113.

ANNEXE

«Stealth in practice: The Royal Navy's Trafalgar-class submarine». Rupert Pengelley, International Defence Review 1/1989, p. 27.

«Small, quiet, low-cost and lethal, France's nuclear-powered attack submarine,» Gérard Tubé, International Defence Review 1/1989, p. 33.

«Canadian Nuclear Attack Submarine Program: Issues for Congress,» mise à jour le 22 mars 1989, Ronald O'Rourke. Congressional Research Office, Library of Congress.

«Attack submarines and Aircraft carrier battle groups: A new mix for the U.S. Navy?» Ronald O'Rourke, Congressional Research Office, Library of Congress.